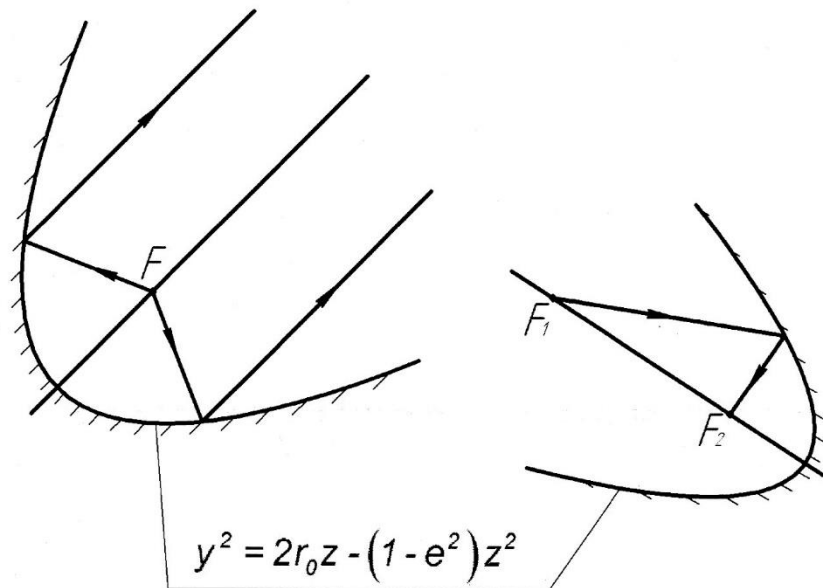


ІІТМО

Л.Н. Андреев, В.В. Ежова

ПРИКЛАДНАЯ ТЕОРИЯ АБЕРРАЦИЙ. ЧАСТЬ ВТОРАЯ



Санкт-Петербург
2023

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Л.Н. Андреев, В.В. Ежова
ПРИКЛАДНАЯ ТЕОРИЯ АБЕРРАЦИЙ.
ЧАСТЬ ВТОРАЯ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 12.04.02 Оптическое
в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных
образовательных программ высшего образования магистратуры

ИТМО

Санкт-Петербург
2023

Андреев Л.Н., Ежова В.В., Прикладная теория аберраций. Часть вторая. - Учебное пособие. - СПб: Университет ИТМО, 2023. - 51 с.

Учебное пособие предназначено для преподавателей, ведущих лекционные, практические и лабораторные занятия по дисциплинам «Фотоника», «Дизайн оптических систем», «Осветительная оптика», и для обучающихся по данным дисциплинам. Также пособие можно использовать при написании магистерских диссертаций по образовательной программе «Прикладная оптика».

В учебном пособии рассмотрены основные положения теории аберраций третьего порядка отражающих поверхностей второго порядка: сферических, параболических, эллиптических, гиперболических. Для иллюстрации приведены принципиальные оптические схемы некоторых зеркальных, зеркально-линзовых систем, компенсаторов аберраций и методики их расчета.

©Университет ИТМО, 2023

© Андреев Л.Н., Ежова В.В., 2023

Содержание

Предисловие.....	4
ГЛАВА 1. Основы теории aberrаций третьего порядка оптических систем, содержащих отражающие и асферические поверхности второго порядка.....	5
1.1. Геометрические свойства асферических отражающих поверхностей второго порядка.....	5
1.2. Коэффициенты aberrаций третьего порядка отражающих поверхностей второго порядка.....	9
1.3. Теорема об aberrационных свойствах отражающих поверхностей второго порядка.....	15
1.4. Связь aberrаций третьего порядка с коэффициентами $S_I, S_{II} \dots S_V$ отражающих поверхностей второго порядка.....	17
1.5. Коэффициенты aberrаций третьего порядка и основные параметры \bar{P} и \bar{W} бесконечно тонкой линзы и системы из тонких компонентов, содержащих асферические поверхности второго порядка.....	19
Вопросы для самоконтроля.....	22
ГЛАВА 2. Зеркальные, линзовые, зеркально-линзовые системы и компенсаторы.....	23
2.1. Система из двух сферических зеркал.....	23
2.2. Двухзеркальный концентрический объектив.....	25
2.3. Двухзеркальные объективы из асферических поверхностей второго порядка.....	29
2.4. Сферическое зеркало и плоскопараллельная пластинка.....	31
2.5. Сферическое зеркало и мениск.....	32
2.6. Двухлинзовый афокальный компенсатор.....	34
2.7. Компенсатор кривизны поверхности изображения.....	35
2.8. Компенсаторы хроматических aberrаций.....	36
2.9. Модульный принцип проектирования зеркально-линзового объектива.....	38
2.10. Методика расчета линзовых систем с асферическими поверхностями второго порядка.....	40
Вопросы для самоконтроля.....	50
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	51

Предисловие

Данное пособие является продолжением учебного пособия Андреев Л. Н., Ежова В. В. «Прикладная теория аберраций. Часть первая», Университет ИТМО, 2020 г., а также переработанным и дополненным пособием Андреев Л. Н., Ежова В. В. «Прикладная теория аберраций. Часть вторая», НИУ ИТМО, 2011 г. [1].

В нем рассматриваются основные положения теории аберраций третьего порядка и методики расчёта оптических систем, содержащих отражающие и асферические поверхности второго порядка, в том числе параболоидальные, эллипсоидальные и гиперболоидальные.

Несмотря на определенные технологические трудности изготовления отражающих поверхностей, по сравнению с преломляющими, зеркальные и зеркально-линзовые оптические системы обладают рядом преимуществ, по сравнению с линзовыми. Это, прежде всего, широкая область ахроматизации и увеличенное рабочее расстояние.

Асферические поверхности второго порядка также, несмотря на сложности их изготовления, используются при проектировании различных оптических систем. Это объясняется тем, что их применение успешно позволяет решать следующие задачи: улучшение качества изображения (коррекция аберраций), повышение оптических характеристик (относительное отверстие, угловое поле), уменьшение массогабаритных характеристик (сокращение числа линз).

Учебное пособие предназначено для студентов, изучающих дисциплины «Фотоника», «Дизайн оптических систем», «Осветительная оптика», которые являются основой для последующих дисциплин программы магистратуры «Прикладная оптика» по направлению 12.04.02 Опотехника и развития общепрофессиональных компетенций: ОПК-1. Способен организовывать и осуществлять научные исследования, представлять, оформлять и защищать результаты интеллектуальной деятельности; ОПК-3. Способен организовать процесс принятия, обоснования и оценки эффективности проектных и управленческих решений в профессиональной сфере с учетом финансово-экономических, экологических, социальных, интеллектуально-правовых, этических и других ограничений, и профессиональных компетенций: ПК-1. Способен выполнять теоретические и экспериментальные исследования в области оптической, оптико-электронной, лазерной и световой инженерии, фотоники, оптоэлектроники и приборостроения. Также пособие будет полезно и при написании магистерских диссертаций.

ГЛАВА 1. Основы теории aberrаций третьего порядка оптических систем, содержащих отражающие и асферические поверхности второго порядка

1.1. Геометрические свойства асферических отражающих поверхностей второго порядка

Уравнения кривых второго порядка имеют вид [2, 3]:

$$y^2 = Az + Bz^2; \quad (1.1)$$

$$y^2 = 2r_0z - (1 - e^2)z^2. \quad (1.2)$$

Коэффициент A в (1.1) определяет величину радиуса кривизны поверхности кривой в её вершине:

$$A = 2r_0. \quad (1.3)$$

В случае отрицательного B уравнение (1.1) определяет собой эллипс, при положительном B - гиперболу, а при равенстве B нулю - параболу.

В уравнении (1.2) e - эксцентриситет кривой второго порядка.

Если $e^2=0$, имеем окружность, при $e^2=1$ - параболу, при $0 < e^2 < 1$ - эллипс, при $e^2 > 1$ - гиперболу.

Сферическое зеркало

Уравнение окружности (рис. 1.1) при $e^2=0$ в уравнении (1.2) имеет вид:

$$y^2 = 2r_0 - z^2. \quad (1.4)$$

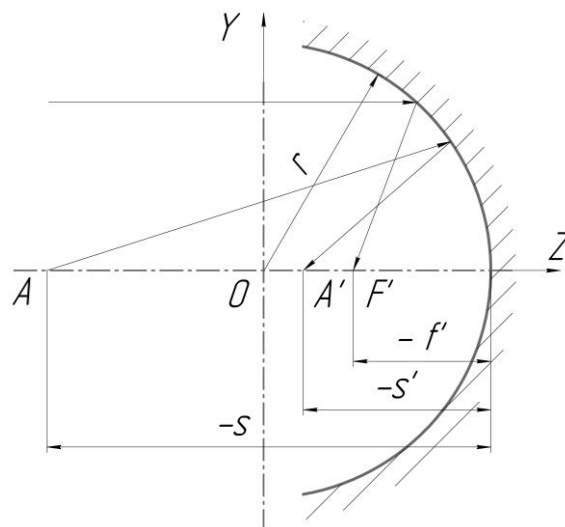


Рисунок 1.1 - Сферическое зеркало

Фокусное расстояние сферического зеркала определяется из рассмотрения инварианта Аббе:

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r}; \quad (1.5)$$

так как $n = -n' = 1$, то

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{2}{r}; \quad (1.6)$$

$$s \rightarrow \infty; s' \rightarrow f';$$

$$f' = \frac{r}{2}. \quad (1.7)$$

Линейное увеличение в сопряженных плоскостях, проходящих через точки A и A' (рис. 1.1), равно:

$$\beta = \frac{n's'}{ns} = -\frac{s'}{s} = \frac{1}{\frac{2}{r}s - 1}; \quad (1.8)$$

$$s' = \frac{1}{\frac{2}{r} - \frac{1}{s}}. \quad (1.9)$$

Параболическое зеркало

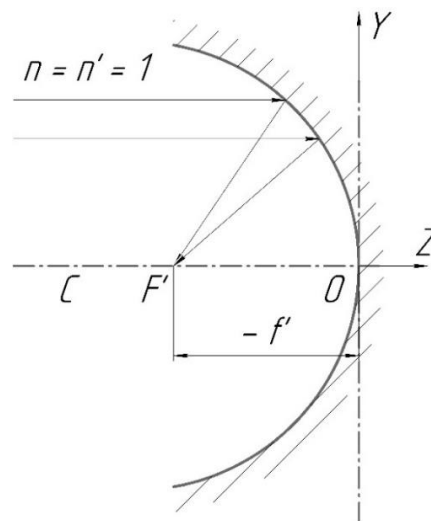


Рисунок 1.2 - Параболическое зеркало

Основное свойство параболы: парабола является геометрическим местом точек, равноудаленных от фокуса и директрисы. Из этого свойства вытекает, что для параболического зеркала все лучи, идущие из бесконечно удаленной точки на оси, после отражения собираются в фокусе F' [8].

Для параболы уравнение (1.2) при $e^2=1$ имеет вид:

$$y^2 = 2r_0z; \quad (1.10)$$

$$f' = \frac{r_0}{2} = s,$$

где r_0 - радиус при вершине параболы.

Эллиптическое зеркало

На рис. 1.3: AB - большая ось ($2a$), CD - малая ось ($2b$), A, B, C, D - вершины, O - центр, F_1 и F_2 - фокусы, $e = \frac{c}{a}$ - эксцентриситет.

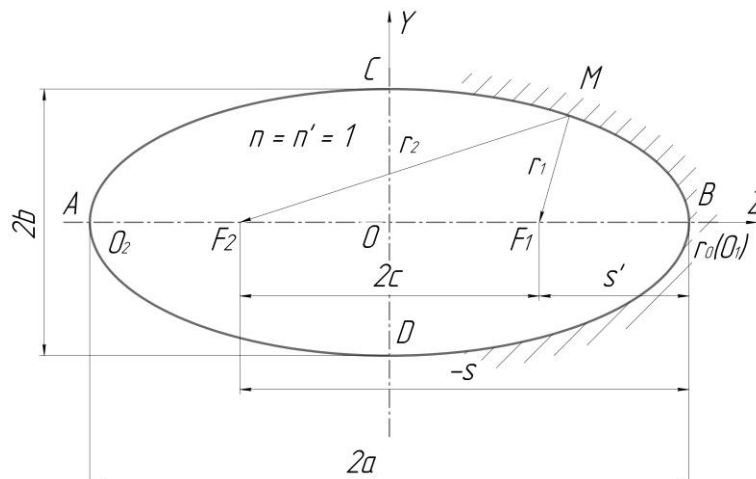


Рисунок 1.3 – Эллиптическое зеркало

Эллипс является геометрическим местом точек, для которых сумма расстояний от двух заданных точек (фокусов) есть величина постоянная ($2a$) [3]. Каждое из этих расстояний выражается:

$$r_1 = MF_1 = a - er; \quad r_2 = MF_2 = a + er; \quad r_1 + r_2 = 2a. \quad (1.11)$$

Радиус кривизны в вершинах A и B равен $r_{0(A,B)} = \frac{b^2}{a}$, а для C и D

$$r_{0(C,D)} = \frac{a^2}{b}.$$

Из свойств эллипса вытекает, что плоскости, проходящие через точки фокусов F_1 и F_2 перпендикулярно оптической оси, являются сопряженными.

Тогда линейное увеличение в этих сопряжённых плоскостях будет равно:

$$\beta = \frac{n's'}{ns} \quad \text{при } n = -n' = 1 \text{ имеем}$$

$$\beta = -\frac{s'}{s}. \quad (1.12)$$

Из рис. 1.3 следует, что:

$$s = 2c + s' = 2c + a - c = a(1 + e);$$

$$s' = a - c - c = a - ae = a(1 - e); \quad (1.13)$$

$$\beta = -\frac{s'}{s} = -\frac{a(1-e)}{a(1+e)} = \frac{e-1}{e+1}. \quad (1.14)$$

Далее из варианта Аббе и (1.14) получают:

$$s = \frac{r_0}{1-e}; \quad s' = \frac{r_0}{1+e}; \quad r_0 = s(1-e);$$

$$S'_F - S_F = r \left(\frac{1}{1+e} - \frac{1}{1-e} \right) = r \frac{1-e-1-e}{(1-e^2)} = -\frac{2re}{(1-e^2)}. \quad (1.15)$$

Выражая величины a, b, c через r_0 и e , имеют:

$$a = r_0 \frac{1}{(1-e^2)};$$

$$b = \frac{r_0}{\sqrt{(1-e^2)}}; \quad (1.16)$$

$$c = r_0 \frac{e}{(1-e^2)}.$$

В случае, если начало координат находится в вершине эллипса (A, B), уравнение эллипса имеет вид (1.2):

$$y^2 = 2r_0z - (1-e^2)z^2, \quad 0 < e^2 < 1.$$

Гиперболическое зеркало

На рис. 1.4: Z - действительная ось, O_1, O_2 - вершины, O - центр, F_1 и F_2 - фокусы - точки, лежащие на оси по обе стороны от центра на расстоянии C от него.

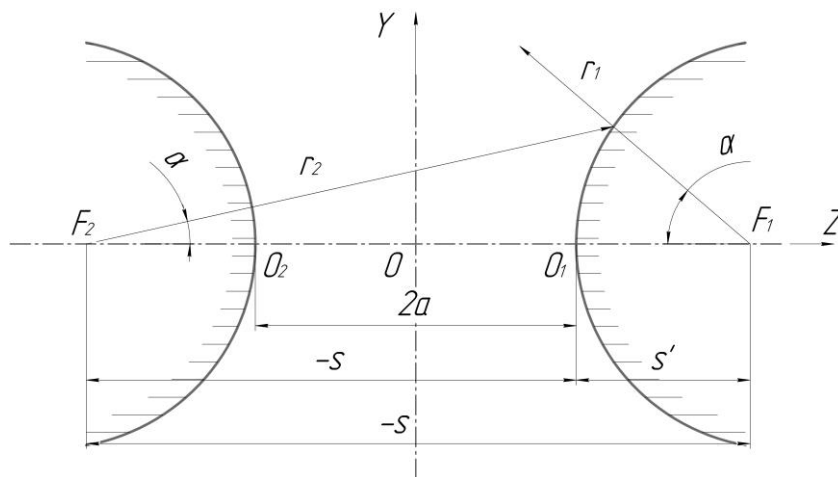


Рисунок 1.4 – Гиперболическое зеркало: $2b = 2\sqrt{c^2 - a^2}$, $e = \frac{c}{a} > 1$

Фокальное свойство гиперболы

Гипербола является геометрическим местом точек, для каждой из которых разность расстояний до двух заданных точек (фокусов) есть величина постоянная, равная $2a$ [3].

Точки, для которых $r_1 - r_2 = 2a$, принадлежат одной ветви гиперболы рис. 1.4 (левой), точки, для которой $r_2 - r_1 = 2a$, - другой её ветви (правой). Каждое из этих расстояний выражается: $r_1 = (ez - a)$; $r_2 = (ez + a)$.

Радиус в вершинах O_1 и O_2 : $r_0 = \frac{b^2}{a}$.

Величины s и s' можно выразить через e и r_0 :

$$\begin{aligned} s' &= \frac{2c - 2a}{2} = c - a; \\ s &= -s' - 2a = -(c - a); \\ \beta &= \frac{n's'}{ns} = \frac{c - a}{c + a}; \end{aligned} \quad (1.17)$$

$$a = \frac{r_0}{(e^2 - 1)}; \quad c = ae = \frac{r_0 e}{(e^2 - 1)};$$

$$s = \frac{r_0}{1 - e}; \quad s' = \frac{r_0}{1 + e}; \quad \beta = \frac{e - 1}{e + 1}.$$

Для гиперболы $e^2 > 1$.

1.2. Коэффициенты аббераций третьего порядка отражающих поверхностей второго порядка

Сферическое зеркало

1. Предмет расположен на бесконечности.

При $\alpha_1 = 0$, $\alpha' = 1.0$, $\beta_1 = 1.0$, $h_1 = f' = 1.0$, $J = -1.0$, $n = -n' = 1.0$, коэффициенты аббераций следующие:

$$\begin{aligned} \bar{S}_I &= \bar{P}; \\ \bar{S}_{II} &= \bar{H}\bar{P} - \bar{W}; \\ \bar{S}_{III} &= \bar{H}^2\bar{P} - 2\bar{H}\bar{W} - 1; \\ \bar{S}_{IV} &= \Phi = 1; \\ \bar{S}_V &= \bar{H}^3\bar{P} - 3\bar{H}^2\bar{W} - 2\bar{H}, \end{aligned} \quad (1.18)$$

где \bar{P} и \bar{W} - основные параметры сферического зеркала, \bar{H} - приведенная высота пересечения второго параксиального луча с зеркалом.

Раскрыв выражения основных параметров сферического зеркала, получают:

$$\bar{W} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta\frac{1}{n}} \Delta\alpha \frac{1}{n} = \frac{1}{-2}(-1) = 0.50; \quad (1.19)$$

$$\bar{P} = \left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta\frac{1}{n}} \right)^2 \Delta\alpha \frac{1}{n} = \frac{1}{4}(-1) = -0.25.$$

Подставляя эти значения \bar{P} и \bar{W} в (1.18), имеют:

$$\begin{aligned} \bar{S}_I &= -\frac{1}{4}; \\ \bar{S}_{II} &= \frac{1}{4}\bar{s}_p + \frac{1}{2}; \\ \bar{S}_{III} &= -\frac{1}{4}\bar{s}_p^2 + \bar{s}_p - 1; \\ \bar{S}_{IV} &= 1; \\ \bar{S}_V &= -\frac{1}{4}\bar{s}_p^3 + \frac{3}{2}\bar{s}_p^2 - 2\bar{s}_p, \end{aligned} \quad (1.20)$$

где $\bar{s}_p = \bar{H}$, так как $\beta_1 = 1$.

В таблице 1.1 приведены числовые значения коэффициентов aberrаций \bar{S}_I , \bar{S}_{II} , \bar{S}_{III} , \bar{S}_{IV} , \bar{S}_V для некоторых значений входного зрачка $\bar{s}_p = \bar{H}$ при $s = \infty$.

Таблица 1.1

\bar{s}_p	\bar{S}_I	\bar{S}_{II}	\bar{S}_{III}	\bar{S}_{IV}	\bar{S}_V
0	-0.25	0.50	-1.0	1.0	0
-1.0	-0.25	0.25	-0.25	1.0	-0.75
-2.0	-0.25	0	0	1.0	0

Из анализа уравнений (1.20) и таблицы 1.1 следует, что в случае расположения входного зрачка в центре кривизны зеркала ($\bar{s}_p = -2.0$) - кома, астигматизм и дисторсия третьего порядка равны нулю $\bar{S}_{II} = \bar{S}_{III} = \bar{S}_V = 0$.

2. Предмет расположен на конечном расстоянии от сферического зеркала $s \neq s' = \infty$.

Коэффициенты aberrаций \bar{S}_I , \bar{S}_{II} , \bar{S}_{III} , \bar{S}_{IV} , \bar{S}_V , связанные с параметрами W и P , приведены в [10]:

$$\begin{aligned}
S_I &= hP; \\
S_{II} &= HP - JW; \\
S_{III} &= \frac{H^2}{h}P - 2J\frac{H}{h}W - J^2\Phi; \\
S_{IV} &= \Phi; \\
S_V &= \frac{H^3}{h^3}P + 3J\frac{H^3}{h^3}W - 2J\frac{H}{h^2}\Phi.
\end{aligned} \tag{1.21}$$

Раскрыв выражение W и P при следующих условиях нормирования, получают: $\alpha_1 = n'\beta^x = -\beta^x$, $\alpha' = 1.0$, $n = -n' = 1.0$.

Тогда:

$$\begin{aligned}
W &= \frac{\Delta\alpha}{\Delta\frac{1}{n}}\Delta\alpha\frac{1}{n} = \frac{1}{2}(1 - \beta^{x2}) = \bar{W}(1 - \beta^{x2}); \\
P &= \left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta\frac{1}{n}}\right)^2 \Delta\alpha\frac{1}{n} = -\frac{1}{4}(1 - \beta^{x2})(1 + \beta^x) = \bar{P}(1 - \beta^{x2})(1 + \beta^x).
\end{aligned} \tag{1.22}$$

Подставляя значения W и P (1.22) в (1.21) и имея в виду, что $h_1 = -\beta^x s$, $H = \bar{s}_p$, $J = -\beta^x(s_p - s)$, а так как $\bar{W} = \frac{1}{2}$; $\bar{P} = -\frac{1}{4}$, получают:

$$\begin{aligned}
S_I &= -\frac{1}{4}s_p\beta^x(1 - \beta^{x2})(1 + \beta^x); \\
S_{II} &= -\frac{1}{4}s_p\beta^x(1 - \beta^{x2})(1 + \beta^x) + \frac{1}{2}\beta^x(1 - \beta^{x2})(s_p - s); \\
S_{III} &= -\frac{1}{4}s_p\frac{(1 - \beta^{x2})(1 + \beta^x)}{s\beta^x} - \frac{s_p}{s}(1 - \beta^{x2})(s_p - s) - \beta^x(s_p - s)\Phi; \\
S_{IV} &= \Phi = \frac{1}{f'}; \\
S_V &= -\frac{1}{4}s_p^3\frac{(1 - \beta^{x2})(1 + \beta^x)}{s^2\beta^{x2}} - \frac{3s_p^2}{2s^2}\frac{(1 - \beta^{x2})(s_p - s)}{\beta^x} - 2\frac{\beta^{x2}(s_p - s)s_p}{s}\Phi.
\end{aligned} \tag{1.23}$$

Параболическое зеркало

Коэффициенты aberrаций 3-го порядка для одной асферической поверхности 2-го порядка \bar{S}_I , \bar{S}_{II} , \bar{S}_{III} , \bar{S}_{IV} , \bar{S}_V при $\alpha_1 = 0$, $\alpha' = 1.0$, $\beta_1 = 1.0$,

$h_1 = f' = 1.0$, $J = -1.0$, $n = -n' = 1.0$ имеют вид:

$$\begin{aligned}\bar{S}_I &= \bar{P} + \Delta\bar{P}; \\ \bar{S}_{II} &= \bar{H}(\bar{P} + \Delta\bar{P}) - J\bar{W}; \\ \bar{S}_{III} &= \bar{H}^2(\bar{P} + \Delta\bar{P}) - 2\bar{H}\bar{W} - 1; \\ \bar{S}_{IV} &= 1; \\ \bar{S}_V &= -\bar{H}^3(\bar{P} + \Delta\bar{P}) + 3\bar{H}^2\bar{W} + 2\bar{H},\end{aligned}\tag{1.24}$$

где $\Delta\bar{P}$ - дополнительный параметр асферического зеркала, \bar{H} - приведенная высота пересечения второго параксиального луча с зеркалом,

$$\bar{W} = \frac{1}{2}, \quad \bar{P} = -\frac{1}{4}.$$

Для параболы имеют:

$$\Delta\bar{P} = \frac{(\alpha'n' - \alpha n)^3}{(n' - n)^2} b = -e^2 \frac{(\alpha'n' - \alpha n)^3}{(n' - n)^2} = \frac{1}{4}, \text{ так как } e^2 = 1.\tag{1.25}$$

Подставляя значения \bar{P} , $\Delta\bar{P}$ и \bar{W} в выражение (1.24), получают:

$$\begin{aligned}\bar{S}_I &= 0; & \bar{S}_I &= 0; \\ \bar{S}_{II} &= \frac{1}{2}; & \bar{S}_{II} &= \bar{W}; \\ \bar{S}_{III} &= -\bar{s}_p - 1; & \bar{S}_{III} &= -\bar{H} - 1; \\ \bar{S}_{IV} &= 1; & \bar{S}_{IV} &= 1; \\ \bar{S}_V &= \frac{3}{2}\bar{s}_p^2 - 2\bar{s}_p; & \bar{S}_V &= \frac{3}{2}\bar{H}^2 - 2\bar{H}.\end{aligned}\tag{1.26}$$

В таблице 1.2 приведены числовые значения коэффициентов aberrаций \bar{S}_I , \bar{S}_{II} , \bar{S}_{III} , \bar{S}_{IV} , \bar{S}_V для некоторых значений входного зрачка $\bar{s}_p = \bar{H}$, где

\bar{s}_p - приведенное к фокусному расстоянию параболическое зеркало $\bar{s}_p = \frac{s_p}{r_0}$.

Таблица 1.2

\bar{s}_p	\bar{S}_I	\bar{S}_{II}	\bar{S}_{III}	\bar{S}_{IV}	\bar{S}_V
0	0	0.50	-1.0	1.0	0
-1.0	0	0.50	0	1.0	-0.50
-2.0	0	0.50	1.0	1.0	2.0

Из анализа выражений (1.26) и таблицы 1.2 следует:

1. сферическая aberrация отражающего параболоида для бесконечно удаленного предмета отсутствует ($\bar{S}_I = 0$);

2. кома (\bar{S}_{II}) не зависит от положения входного зрачка;
3. в случае расположения входного зрачка в фокусе зеркала ($\bar{s}_p = -1.0$) астигматизм отсутствует ($\bar{S}_{III} = 0$);
4. дисторсия отсутствует при $\bar{s}_p = 0$ и $\bar{s}_p = -\frac{4}{3}$.

Эллиптическое зеркало

Коэффициенты aberrаций третьего порядка для эллипсоидальной отражающей поверхности имеют вид (1.27) [10]:

$$\begin{aligned}
 S_I &= h(P + \Delta P); \\
 S_{II} &= H(P + \Delta P) - JW; \\
 S_{III} &= \frac{H^2}{h}(P + \Delta P) - 2J \frac{H}{h} W - J^2 \frac{1}{h} \Delta \frac{\alpha}{n}; \\
 S_{IV} &= \Phi = \frac{1}{h} \Pi = \frac{1}{h} \frac{\Delta \alpha n}{nn'}; \\
 S_V &= \frac{H^3}{h^2}(P + \Delta P) - 3J \frac{H^2}{h^2} W - 2J^2 \frac{H}{h^2} \left(3\Delta \frac{\alpha}{n} + \frac{\Delta \alpha n}{nn'} \right),
 \end{aligned} \tag{1.27}$$

где h и H - высоты пересечения первого и второго параксиального лучей с отражающей поверхностью; J - инвариант Лагранжа; α и α' - углы пересечения первого параксиального луча с оптической осью.

Раскрыв выражения P , ΔP , W , h , H и J для эллипса при следующих условиях нормирования: $\alpha_1 = -\beta^x$, $\alpha' = 1.0$, $n = -n' = 1.0$, получают:

$$\begin{aligned}
 s &= \frac{r_0}{1-e}; \quad s' = \frac{r_0}{1+e}; \quad \beta^x = -\frac{1-e}{e+1}; \\
 h &= s\alpha = s \frac{1-e}{1+e}; \quad H = s_p; \\
 J &= -(s_p - s) \frac{1-e}{1+e}; \quad \Phi = \frac{2}{r_0} = \frac{2}{s(1-e)}; \\
 W &= \frac{\Delta \alpha}{\Delta \frac{1}{n}} \Delta \alpha \frac{1}{n} = -\frac{2e}{(1-e)^2}; \\
 P &= \left(\frac{\Delta \alpha}{\Delta \frac{1}{n}} \right)^2 \Delta \alpha \frac{1}{n} = -\frac{2e^2}{(1+e)^3}; \quad \Delta P = -e^2 \frac{\Delta \alpha n^2}{\Delta n^2} = \frac{2e^3}{(1+e)^3}.
 \end{aligned}$$

После подстановки этих величин в (1.27), получают:

$$\begin{aligned}
S_I &= s \frac{1-e}{1+e} \left[-\frac{2e^2}{(1+e)^3} + \frac{2e^2}{(1+e)^3} \right] = 0; \\
S_{II} &= -\frac{2(s_p - s)(1-e)e}{(1+e)^3}; \\
S_{III} &= \frac{4(s_p - s)}{s} \frac{e}{(1+e)^2} + \frac{2(s_p - s)^2}{s} \frac{(1-e)}{(1+e)^2}; \\
S_{IV} &= \frac{\Delta \frac{1}{n}}{r_0} = \Phi = \frac{1}{h} \frac{\Delta \alpha n}{nn'}; \\
S_V &= -\frac{6e}{(1-e^2)} \frac{(s_p - s)s_p^2}{s^2} - \frac{4(s_p - s)^2 s_p}{s^2(1+e)}.
\end{aligned} \tag{1.28}$$

В таблице 1.3 приведены числовые значения S_I , S_{II} , S_{III} , S_{IV} , S_V при расположении предмета в одном из фокусов эллипса $s = \frac{r_0}{1-e}$ для различных положений входного зрачка s_p при $e=0.5$ и $s=-100$.

Таблица 1.3

s_p	S_I	S_{II}	S_{III}	S_{IV}	S_V
0	0	-14.80	44.44	-0.04	0
$\frac{r}{2}$	0	-11.11	8.33	-0.04	18.75
$\frac{r}{1+e}$	0	-9.87	0	-0.04	9.87
r	0	-7.41	-11.11	-0.04	-16.65

Из анализа уравнений (1.28) и таблицы 1.3 следует:

1. в случае расположения предмета в одном из фокусов отражающего эллипсоида ($S_I = 0$), то есть сферическая аберрация отсутствует и гомоцентричность пучка не нарушается;
2. кома (η) не зависит от положения входного зрачка;
3. в случае расположения предмета и входного зрачка соответственно в фокусах F_1 и F_2 - $S_{III} = 0$, то есть астигматизм отсутствует;
4. дисторсия отсутствует при $s_p = 0$ и $s_p = \frac{2(1-e)}{2+e} s = \frac{2r_0}{2+e}$.

Гиперболическое зеркало

При вычислении коэффициентов aberrаций третьего порядка для отражающего гиперблоида могут быть использованы уравнения (1.28). Эксцентриситет гиперболы $e^2 > 1$.

В таблице 1.4 приведены числовые значения $S_I, S_{II}, S_{III}, S_{IV}, S_V$ при расположении предмета в одном из фокусов гиперболы $s = -\frac{r_0}{1-e}$ для различных положений входного зрачка s_p при $e=1.5$ и $s=-100$.

Таблица 1.4

s_p	S_I	S_{II}	S_{III}	S_{IV}	S_V
0	0	9.60	-16.00	0.04	0
$\frac{r}{2}$	0	11.52	0	0.04	-11.50
$\frac{r}{1+e}$	0	12.00	5.00	0.04	-6.25
r	0	14.40	36.00	0.04	50.00

Из анализа уравнений (1.28) и таблицы 1.4, как и в случае расположения предмета в одном из фокусов гиперболы, так как же и для эллипса, следует:

1. сферическая aberrация отсутствует ($S_I = 0$);
2. кома (η) не зависит от положения входного зрачка (s_p);
3. в случае расположения предмета и входного зрачка соответственно в фокусах F_1 и F_2 - $S_{III} = 0$, то есть астigmatизм отсутствует;
4. дисторсия исправлена при $s_p = 0$ и $s_p = \frac{2(1-e)}{2+e} s = \frac{2r_0}{2+e}$.

1.3. Теорема об aberrационных свойствах отражающих поверхностей второго порядка

На основе теории aberrаций 3-го порядка и фокальных свойств кривых второго порядка может быть сформулирована следующая теорема.

Отражающие поверхности второго порядка - параболоидальная, эллипсоидальная и гиперблоидальная - обладают следующими свойствами:

1. при расположении предмета в одном из фокусов сферическая aberrация 3-го порядка исправлена ($S_I = 0$), и при этом гомоцентричность пучка лучей не нарушается;
2. при выполнении п.1 кома 3-го порядка (η) не зависит от положения

- входного зрачка (s_p);
3. при выполнении п.1 астигматизм 3-го порядка (S_{III}) зависит от положения входного зрачка (s_p), и при расположении предмета и входного зрачка в сопряженных фокусах F_1 и F_2 соответственно он исправлен ($S_{III} = 0$);
 4. при выполнении п.1 дисторсия 3-го порядка (S_V) зависит от положения входного зрачка (s_p), и при $s_p = 0$ и $s_p = \frac{2r_0}{2+e}$ отсутствует ($S_V = 0$).
 5. кривизна поверхности изображения (S_{IV}) не зависит от положения входного зрачка (s_p) и эксцентриситета (e), так как $S_{IV} = \Phi = \frac{2}{r_0}$.

Доказательство этой теоремы вытекает из рассмотрения коэффициентов aberrаций 3-го порядка: S_I , S_{II} , S_{III} , S_{IV} , S_V (1.26, 1.28).

Следует заметить, что несмотря на то, что $S_{II} = f(s_p)$ в (1.26 и 1.28), кома третьего порядка, определяемая величиной отступления от изопланазии, η [10], не зависит от s_p . Это следует из рассмотрения выражения $\eta = -\frac{1}{2} \frac{tg \sigma'}{J} S_{II}$, где $J = -(s_p - s) \frac{1-e}{1+e}$ [2, 10]. Подставляя выражение для инварианта Лагранжа J в выражение для η , имеют $\eta = \frac{e}{1+e} tg^2 \sigma'$, следовательно, кома третьего порядка (η) не зависит от положения входного зрачка s_p , что и подтверждает второй пункт теоремы.

Далее рассматривается астигматизм третьего порядка, определяемый выражением: $z'_s - z'_m = \frac{y^2}{(s_p - s)^2} S_{III}$ [2, 10]. Раскрывая выражение S_{III} в (1.28),

принимая во внимание, что для эллипса и гиперболы $s = \frac{r_0}{1-e}$ и $s_p = \frac{r_0}{1+e}$ в (1.28), получается, что $S_{III} = 0$. Следовательно, астигматизм исправлен, что подтверждает третий пункт теоремы.

Из рассмотрения величины S_V , определяющей дисторсию 3-го порядка, в (1.28) видно, что дисторсия зависит от положения входного зрачка. Решая уравнение для S_V в (1.28) относительно s_p , находят, что $S_V = 0$ при $s_p = 0$ и $s_p = \frac{2(1-e)}{2+e} s = \frac{2r_0}{2+e}$.

Следует отметить, что приведенные результаты исследования коррекционных свойств отражающих асферических поверхностей второго порядка в области Зейделя могут быть полезны при проектировании и

расчете зеркальных и зеркально-линзовых оптических систем.

1.4. Связь aberrаций третьего порядка с коэффициентами $S_I, S_{II} \dots S_V$ отражающих поверхностей второго порядка

Связь aberrаций с коэффициентами aberrаций (сумма Зейделя) может быть найдена из рассмотрения универсальных выражений разложения aberrаций третьего порядка [2, 10] (1.14).

В отличие от формул, приведенных в [10] (1.15–1.19) при $n = n' = 1$, в случае отражающих поверхностей надо иметь в виду, что $n = -n' = 1$.

Ниже приведены формулы для сферического зеркала при различных условиях нормирования.

Предмет находится на бесконечности: $s_1 = \infty$, $\alpha_1 = 0$, $\alpha' = 1$, $J = -1$, $h = f' = 1$, $n = -n' = 1$.

$$\begin{aligned}
 \Delta \bar{s}' &= \frac{1}{2} f t g^2 \sigma \bar{S}_I = \frac{1}{4} r t g^2 \sigma \bar{S}_I = -\frac{r}{16} t g^2 \sigma' = -\frac{D^2}{16r}; \\
 \Delta y' &= \frac{1}{2} f t g^3 \sigma \bar{S}_I = \frac{1}{4} r t g^3 \sigma \bar{S}_I = -\frac{r}{16} t g^3 \sigma' = -\frac{D^3}{16r^2}; \\
 \Delta y'_K &= \frac{3}{2} f t g^2 \sigma' t g \omega_1 \bar{S}_{II} = \frac{3}{4} r t g^2 \sigma' t g \omega_1 \left(-\frac{1}{4} \bar{s}_p + \frac{1}{2} \right); \\
 \eta &= \frac{1}{2} t g \sigma \bar{S}_{II} = \frac{1}{2} t g^2 \sigma' \left(-\frac{1}{4} \bar{s}_p + \frac{1}{2} \right); \\
 z'_m &= \frac{1}{2} f t g^2 \omega_1 (3\bar{S}_{III} + \bar{S}_{IV}) = \frac{r}{4} t g^2 \omega_1 \left(-\frac{3}{4} \bar{s}_p^2 + 3\bar{s}_p - 2 \right); \\
 z'_s &= \frac{1}{2} f t g^2 \omega_1 (\bar{S}_{III} + \bar{S}_{IV}) = \frac{r}{4} t g^2 \omega_1 \left(-\frac{1}{4} \bar{s}_p^2 + \bar{s}_p \right); \\
 z'_m - z'_s &= f t g^2 \omega_1 \bar{S}_{III} = \frac{r}{4} t g^2 \omega_1 \left(-\frac{1}{4} \bar{s}_p^2 + \bar{s}_p - 1 \right); \\
 \Delta y'_D &= \frac{1}{2} f t g^3 \omega_1 \bar{S}_V = \frac{r}{4} t g^3 \omega_1 \left(-\frac{1}{4} \bar{s}_p^3 + \frac{3}{2} \bar{s}_p^2 - 2\bar{s}_p \right),
 \end{aligned} \tag{1.29}$$

где в левой части (1.29) aberrации третьего порядка, $S_I \dots S_V$ - коэффициенты aberrаций, r - радиус сферического зеркала, D - диаметр входного зрачка, σ' - апертурный угол в пространстве изображения, ω_1 - полевой угол в пространстве предметов, \bar{s}_p - приведенная величина

положения входного зрачка относительно вершины зеркала $\bar{s}_p = \frac{s_p}{f'}$. Следует

заметить, что aberrации даны в пространстве с показателем преломления

$n' = -1$.

Предмет находится на конечном расстоянии: $\beta_1 = 1$, $n = -n' = 1$,
 $J = -\beta^x (s_p - s)$, $s_1 \neq \infty$, $J = -\beta^x$, $h_1 = s_1 \alpha_1$.

$$\begin{aligned}
 \Delta \bar{s}' &= \frac{1}{2} t g^2 \sigma' S_I; \\
 \Delta y' &= \frac{1}{2} t g^3 \sigma' S_I; \\
 \Delta y'_K &= -\frac{3}{2} t g^2 \sigma'' t g \omega_1 S_{II}; \\
 \eta &= \frac{1}{2} \frac{t g^2 \sigma'}{J} S_{II}; \\
 z'_m - z'_s &= t g^2 \omega_1 S_{III}; \\
 \Delta y'_D &= \frac{1}{2} t g^3 \omega_1 S_V.
 \end{aligned} \tag{1.30}$$

Предмет на конечном расстоянии с телецентрическим ходом главного луча: $\alpha_1 = -\beta^x$, $\alpha' = 1$, $\beta_1 = 0$, $h_1 = s_1 \alpha_1$, $J = -\beta^x y_0 = y'_0$, $n = -n' = 1$.

$$\begin{aligned}
 \Delta \bar{s}' &= \frac{1}{2} t g^2 \sigma' S_I; \\
 \Delta y' &= \frac{1}{2} t g^3 \sigma' S_I; \\
 \Delta y'_K &= \frac{3}{2} t g^2 \sigma' \left(\frac{y'}{y'_0} \right) S_{II} = \frac{3}{2} t g^2 \sigma' \left(\frac{y}{y_0} \right) S_{II}; \\
 \eta &= \frac{1}{2} \frac{t g^2 \sigma'}{J} S_{II} = \frac{1}{2} \frac{t g^2 \sigma'}{y'_0} S_{II} = \frac{1}{2} \frac{t g^2 \sigma'}{y_0 \beta^x} S_{II}; \\
 z'_m - z'_s &= \left(\frac{y'}{y'_0} \right)^2 S_{III} = \left(\frac{y}{y_0} \right)^2 S_{III}; \\
 \Delta y'_D &= \frac{1}{2} \left(\frac{y'}{y'_0} \right)^3 S_V = \frac{1}{2} \left(\frac{y}{y_0} \right)^3 S_V,
 \end{aligned} \tag{1.31}$$

где S_I , $S_{II} \dots S_V$ вычисляются по (1.23); y_0 и y'_0 - параксиальные величины предмета и изображения соответственно; y и y' - реальные величины предмета и изображения соответственно.

При вычислении aberrаций отражающих поверхностей второго порядка по (1.29), (1.30) и (1.31) величины S_I , $S_{II} \dots S_V$ находятся из (1.26) и (1.28).

1.5. Коэффициенты aberrаций третьего порядка и основные параметры \bar{P} и \bar{W} бесконечно тонкой линзы и системы из тонких компонентов, содержащих асферические поверхности второго порядка

Коэффициенты aberrаций третьего порядка (суммы Зейделя $\bar{S}_{IA} \dots \bar{S}_{VA}$), определяющие монохроматические aberrации для бесконечно тонких линз с асферическими поверхностями, определяются уравнениями [10] при следующих условиях нормирования $\alpha_1 = 0$, $\alpha' = 1.0$, $h_1 = f' = 1.0$, $n = -n' = 1$, $J = -1$:

$$\begin{aligned} \bar{S}_{IA} &= \bar{P} + \Delta\bar{P} = \bar{P}_A; \\ \bar{S}_{IIA} &= \bar{H}(\bar{P} + \Delta\bar{P}) + \bar{W} = \bar{H}\bar{P}_A + \bar{W}_A; \\ \bar{S}_{IIIA} &= \bar{H}^2(\bar{P} + \Delta\bar{P}) + 2\bar{H}\bar{W} + 1 = \bar{H}^2\bar{P}_A + 2\bar{H}\bar{W}_A + 1; \\ \bar{S}_{IVA} &\approx \frac{1}{n} \approx 0.7; \\ \bar{S}_{VA} &= \bar{H}^3(\bar{P} + \Delta\bar{P}) + 3\bar{H}^2\bar{W} + 3.7\bar{H} = \bar{H}^3\bar{P}_A + 3\bar{H}^2\bar{W}_A + 3.7\bar{H} \end{aligned} \quad (1.32)$$

В системе уравнений (1.32): \bar{P} и \bar{W} - основные параметры линзы со сферическими поверхностями, \bar{P}_A - основной параметр линзы с асферической поверхностью; $\Delta\bar{P}$ - дополнительный параметр, вызванный деформацией поверхности, \bar{H} - приведенная высота пересечения второго параксиального луча с линзой, $\bar{S}_{IA} \dots \bar{S}_{VA}$ - коэффициенты aberrаций третьего порядка линзы с асферической поверхностью.

Для одной асферической поверхности второго порядка дополнительный параметр $\Delta\bar{P}$ равен с $\Delta\bar{P} = \frac{(\alpha'n' - \alpha n)^3}{(n' - n)^2} b$ [10], где коэффициент $b = -e^2$.

В таблицах 1.5–1.7 приведены результаты вычислений основных параметров \bar{P}_A и $\bar{W}_A = \bar{W}$ бесконечно тонких линз с асферической поверхностью в зависимости от их формы, показателя преломления и квадрата эксцентриситета, определяющего деформацию поверхности.

Основные параметры выпукло-плоской линзы

Таблица 1.5

n	$e^2=0$		$e^2=0.5$		$e^2=1$		$e^2=1.5$	
	\bar{W}	\bar{P}	\bar{W}_A	\bar{P}_A	\bar{W}_A	\bar{P}_A	\bar{W}_A	\bar{P}_A
1.50	-0.33	2.33	-0.33	0.33	-0.33	-1.67	-0.33	-3.67
1.75	0.24	1.25	0.24	0.37	0.24	-0.52	0.24	-1.41
2.0	0.50	1.00	0.50	0.50	0.50	0	0.50	-0.50

Основные параметры двояковыпуклой симметричной линзы

Таблица 1.6

n	$e^2=0$		$e^2=0.5$		$e^2=1$		$e^2=1.5$	
	\bar{W}	\bar{P}	\bar{W}_A	\bar{P}_A	\bar{W}_A	\bar{P}_A	\bar{W}_A	\bar{P}_A
1.50	1.33	3.33	1.33	3.08	1.33	2.83	1.33	2.58
1.75	1.33	2.39	1.33	2.28	1.33	2.17	1.33	2.06
2.0	1.33	2.00	1.33	1.94	1.33	1.87	1.33	1.81

Основные параметры плоско-выпуклой линзы

Таблица 1.7

n	$e^2=0$		$e^2=0.5$		$e^2=1$		$e^2=1.5$	
	\bar{W}	\bar{P}	\bar{W}_A	\bar{P}_A	\bar{W}_A	\bar{P}_A	\bar{W}_A	\bar{P}_A
1.50	3.00	9.00	3.00	7.00	3.00	5.00	3.00	3.00
1.75	2.33	5.44	2.33	4.56	2.33	3.67	2.33	2.78
2.0	2.00	4.00	2.00	3.50	2.00	3.00	2.00	2.50

Из рассмотрения системы, табл. 1.5 - 1.7 вытекают свойства бесконечно-тонких линз с асферическими поверхностями второго порядка: во-первых, величина $\bar{W}_A = \bar{W}$; во-вторых, между параметром \bar{P}_A , определяющим сферическую aberrацию третьего порядка, и квадратом эксцентриситета e^2 , определяющим деформацию поверхности, существует линейная зависимость; в-третьих, в системе появляется параметр $\Delta\bar{P}$, зависящий от e^2 и n .

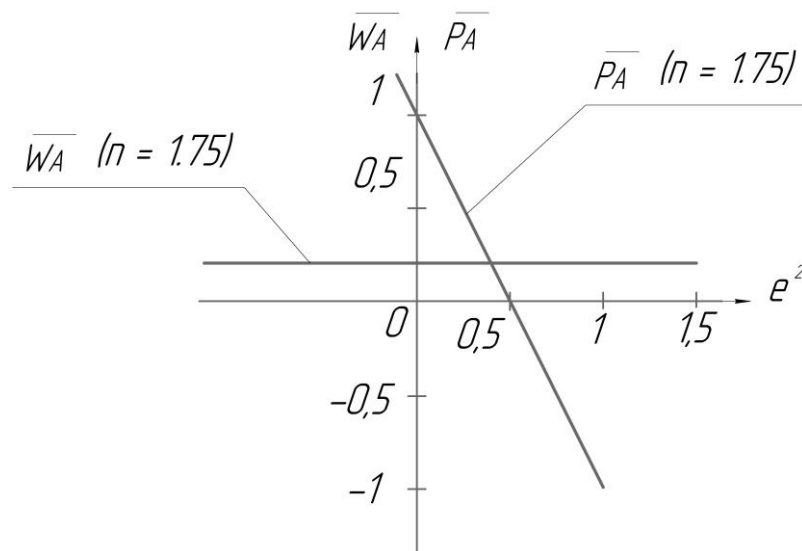


Рисунок 1.5 - Графики зависимости основных параметров \bar{P}_A и \bar{W}_A от e^2 для выпукло-плоской линзы из стекла с показателем преломления $n = 1.75$

Таким образом, варьируя формой линзы, показателем преломления (n) и эксцентриситетом деформированной поверхности (e^2), можно выполнить необходимую коррекцию сферической аберрации и комы для одной тонкой линзы, что невозможно в случае сферической поверхности.

Для системы из тонких компонентов, содержащих асферические поверхности второго порядка, в общем виде выражения для S_I, S_{II}, \dots, S_V имеют вид [10]:

$$\begin{aligned}
 S_I &= \sum_1^m h_k (P_k + \Delta P_k); \\
 S_{II} &= \sum_1^m H_k (P_k + \Delta P_k) - J \sum_1^m W_k; \\
 S_{III} &= \sum_1^m \frac{H_k^2}{h_k} (P_k + \Delta P_k) - 2J \sum_1^m \frac{H_k}{h_k} W_k - J^2 \Phi_k; \\
 S_{IV} &= \sum_1^m \Phi_k \Pi_k; \\
 S_V &= \sum_1^m \frac{H_k^3}{h_k^2} (P_k + \Delta P_k) - 3J \sum_1^m \frac{H_k^2}{h_k^2} W_k + J^2 \sum_1^m \frac{H_k}{h_k} (3 + \Pi_k) \Phi_k,
 \end{aligned} \tag{1.33}$$

где $\Phi_k = \frac{\alpha'_k - \alpha_k}{h_k}$, $\Pi = \sum_1^k \frac{\Phi}{n}$, k - число компонентов.

Таким образом, коэффициенты аберраций третьего порядка систем, содержащих несферические поверхности, отличаются от обычных только тем, что к величине $P = \left(\frac{\Delta \alpha}{\Delta v} \right)^2 \Delta \alpha v$ добавляется член, связанный с

деформацией поверхности $\Delta P = \frac{(\alpha' n' - \alpha n)^3}{(n' - n)^2}$.

Важно отметить, что деформация поверхности влияет только на величину P , оставляя без изменения параметры W и Π . Изменить P_k в компоненте на определенную величину ΔP_k можно введением либо одной асферической поверхности (безразлично какой), либо нескольких. Результат в отношении аберраций третьего порядка будет один и тот же.

Таким образом, применение асферических поверхностей в области аберраций третьего порядка позволяет получать новую степень свободы по одной на каждый компонент, несмотря на число и форму асферических поверхностей.

Вопросы для самоконтроля

1. Какое значение параметра e^2 имеют сферическое зеркало, параболическое зеркало, эллиптическое зеркало, гиперболическое зеркало?
2. Какими свойствами обладают коэффициенты aberrаций третьего порядка сферического зеркала?
3. Какими свойствами обладают коэффициенты aberrаций третьего порядка параболического зеркала?
4. Какими свойствами обладают коэффициенты aberrаций третьего порядка эллиптического зеркала?
5. Какими свойствами обладают коэффициенты aberrаций третьего порядка гиперболического зеркала?
6. Какими свойствами обладают отражающие поверхности второго порядка – параболоидальная, эллипсоидальная, гиперболоидальная поверхности?
7. Связь aberrаций третьего порядка с коэффициентами $S_I, S_{II}, S_{III}, S_{IV}, S_V$ для сферического зеркала, когда предмет располагается на бесконечности.
8. Связь aberrаций третьего порядка с коэффициентами $S_I, S_{II}, S_{III}, S_{IV}, S_V$ для сферического зеркала, когда предмет располагается на конечном расстоянии.
9. Связь aberrаций третьего порядка с коэффициентами $S_I, S_{II}, S_{III}, S_{IV}, S_V$ для сферического зеркала, когда предмет располагается на конечном расстоянии с телецентрическим ходом главного луча.
10. Какими свойствами обладают бесконечно тонкие линзы с асферическими поверхностями второго порядка?
11. Какие параметры можно использовать, чтобы выполнить необходимую коррекцию сферической aberrации и комы для тонкой линзы с асферическими поверхностями второго порядка?
12. Что позволяет получить применение асферических поверхностей в области aberrаций третьего порядка?

ГЛАВА 2. Зеркальные, линзовые, зеркально-линзовые системы и компенсаторы

2.1. Система из двух сферических зеркал

Далее рассматривается общий случай системы из двух сферических зеркал.

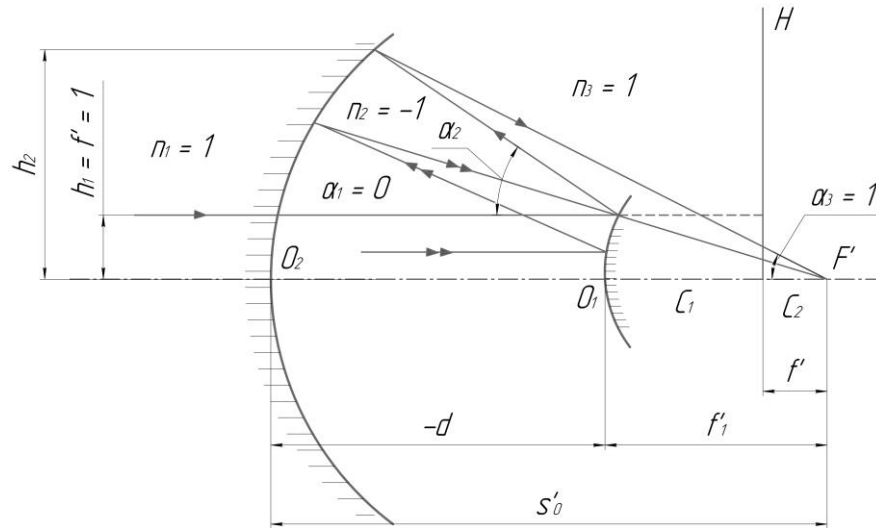


Рисунок 2.1 - Двухзеркальная оптическая система

Можно найти фокусное расстояние f' и задний отрезок s'_0 .

Применив дважды условие инварианта Аббе, получают:

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r} \quad \text{или} \quad \alpha'n' - \alpha n = h_1 \frac{n' - n}{r}. \quad (2.1)$$

Введя условие нормирования: $\alpha_1 = 0$, $\alpha_3 = 1$, $h_1 = f' = 1$, $n_1 = 1$, $n_2 = -1$, $n_3 = 1$, получают:

$$\alpha_2 = h_1 \frac{-1 - 1}{r_1} = \frac{2}{r_1};$$

$$h_2 = h_1 - d\alpha_2 = 1 - d \frac{2}{r_1};$$

$$\alpha + \alpha_2 = h_2 \frac{1 + 1}{r_2} = \left(1 - \frac{2d}{r_1}\right) \frac{2}{r_2}; \quad (2.2)$$

$$\alpha_3 = \frac{2}{r_2} \left(1 - \frac{2d}{r_1}\right) - \alpha_2 = \frac{2}{r_2} \left(1 - \frac{2d}{r_1}\right) - \frac{2}{r_1} = \frac{2}{r_2} - \frac{4d}{r_1 r_2} - \frac{2}{r_1};$$

$$f' = \frac{h_1}{\alpha_3} = \frac{1}{\frac{2}{r_2} - \frac{4d}{r_1 r_2} - \frac{2}{r_1}};$$

$$s'_2 = \frac{h_2}{\alpha_3} = \left(1 - \frac{2}{r_1} d_1\right) f'.$$

Раскрыв выражение коэффициентов aberrаций третьего порядка для системы из двух сферических зеркал, можно записать:

$$\begin{aligned}\bar{S}_I &= \sum_1^2 hP = h_1 P_1 + h_2 P_2; \\ \bar{S}_{II} &= \sum_1^2 HP - J \sum_1^2 W = h_1 P_1 + h_2 P_2 - J(W_1 + W_2); \\ \bar{S}_{III} &= \sum_1^2 \frac{H^2}{h} P - 2J \sum_1^2 \frac{H}{h} W + J^2 \sum_1^2 \Phi = \frac{H_1^2}{h_1} P_1 + \frac{H_2^2}{h_2} P_2 - 2J \left(\frac{H_1}{h_1} W_1 + \frac{H_2}{h_2} W_2 \right) + J^2 (\Phi_1 + \Phi_2); \\ \bar{S}_{IV} &= -f' \sum_1^2 \frac{\Delta \frac{1}{n}}{r} = f' \sum_1^2 \frac{\Delta \alpha n}{nn'} \\ \bar{S}_V &= \sum_1^2 \frac{H^3}{h^2} P - 3J \sum_1^2 \frac{H^2}{h^2} W + J^2 \sum_1^2 \frac{H}{h} (3 + \Pi) \Phi,\end{aligned}\tag{2.3}$$

$$\text{где } P = \left(\frac{\Delta \alpha}{\Delta \frac{1}{n}} \right)^2 \Delta \alpha \frac{1}{n}; \quad W = \frac{\Delta \alpha}{\Delta \frac{1}{n}} \Delta \alpha \frac{1}{n}.$$

При $\alpha_1 = 0$, $\alpha_3 = 1$, $n_1 = n_3 = 1$, $n_2 = -1$:

$$P_1 = -\frac{\alpha_2^3}{4}; \quad W_1 = \frac{\alpha_2^2}{2}; \quad P_2 = \frac{(1 - \alpha_2^2)(1 + \alpha_2)}{4}; \quad W_2 = \frac{(1 - \alpha_2^2)}{2}.\tag{2.4}$$

Объектив из двух сферических зеркал имеет два свободных параметра α_2 и d , которые связаны с величиной t'_1 следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}-d + t'_1 &= h_2; \\ h_2 &= 1 - \alpha_2 d = s'_2; \\ d &= \frac{t'_1 - 1}{1 - \alpha_2}.\end{aligned}$$

Из рассмотрения рисунка видно, что первое зеркало экранирует центральную часть зрачка:

$$\Theta = \frac{f'}{t'_1 \sin \sigma_A};$$

где Θ - центральное экранирование по диаметру; $\sin \sigma_A$ - числовая

апертура; t'_1 - расстояние от вершины первого зеркала до плоскости изображения.

2.2. Двухзеркальный концентрический объектив

Оптическая схема зеркального концентрического объектива приведена на рис. 2.2.

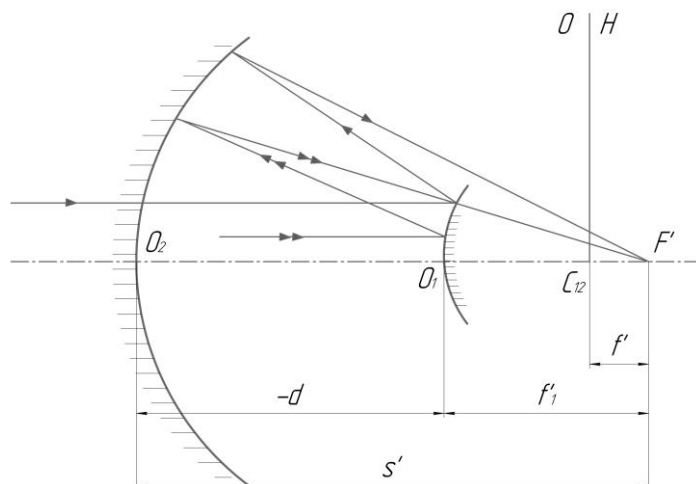


Рисунок 2.2 - Двухзеркальный концентрический объектив

В случае концентрической системы величина $d = r_1 - r_2$.

Подставляя это значение d в (2.2), получают:

$$f' = \frac{r_1 r_2}{2(r_2 - r_1)}; \quad (2.5)$$

$$s' = \frac{r_1 r_2}{2(r_2 - r_1)} \left[1 - \frac{2(r_2 - r_1)}{r_1} \right]. \quad (2.6)$$

Если ввести обозначение $k = \frac{r_1}{r_2}$, тогда

$$\begin{aligned} f' &= \frac{r_2 k}{2(1 - k)}; \\ r_1 &= f' 2(1 - k); \\ r_2 &= f' \frac{2(1 - k)}{k}; \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$d = f' \frac{2(1 - k)^2}{k} = r_1 - r_2;$$

$$s' = f' \frac{2 - k}{k};$$

$$\Theta = \frac{1}{1 - 2k},$$

где f' - фокусное расстояние объектива; r_1 и r_2 - радиусы первого и второго зеркал соответственно; d - воздушное расстояние между зеркалами; Θ - центральное экранирование по диаметру.

В случае, когда предмет находится на конечном расстоянии $s' \neq \infty$, конструктивные элементы определяются:

$$\begin{aligned}
 r_1 &= f'2(1-k); \\
 r_2 &= f' \frac{2(1-k)}{k}; \\
 d &= -f' \frac{2(1-k)^2}{k}; \\
 s &= \left[\frac{1-\beta}{\beta} + 2(1-k) \right] f'; \\
 s' &= \left[1-\beta + 2(1-k) + \frac{2(1-k)^2}{k} \right] f'; \\
 t_2 &= \left[\frac{1-\beta}{\beta} + \frac{2(1-k)}{k} \right] f'; \\
 t_1' &= (3-\beta-2k)f'; \\
 L &= \frac{(\beta-1)^2}{\beta} f'; \\
 \Theta &= \frac{1-\beta(2k-1)}{3-2k},
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

где s и s' - расстояние от вершины первого зеркала до плоскости предмета и расстояние от вершины второго зеркала до плоскости изображения соответственно; t_2 и t_1' - расстояние от вершины второго зеркала до плоскости предмета и расстояние от вершины первого зеркала до плоскости изображения соответственно; β - линейное увеличение; L - длина всей системы (расстояние от плоскости предмета до плоскости изображения).

Особенностью концентрических систем является то, что в области Зейделя, в случае расположения входного зрачка в центре кривизны поверхностей зеркал, коэффициенты аберраций 3-го порядка $S_{II} = S_{III} = S_V = 0$. Это следует из рассмотрения выражений суммы Зейделя в переменных Ланге [10]:

$$S_{II} = \sum_1^2 hP \frac{\Delta\beta}{\Delta\alpha} = \sum_1^2 h \left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta \frac{1}{n}} \right) \Delta\alpha \frac{1}{n} \frac{\Delta\beta}{\Delta\alpha};$$

$$S_{III} = \sum_1^2 h P \left(\frac{\Delta\beta}{\Delta\alpha} \right)^2 = \sum_1^2 h \left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta \frac{1}{n}} \right)^2 \Delta\alpha \frac{1}{n} \left(\frac{\Delta\beta}{\Delta\alpha} \right)^2 = \sum_1^2 h \left(\frac{\Delta\beta}{\Delta \frac{1}{n}} \right)^2 \Delta\alpha \frac{1}{n}; \quad (2.9)$$

$$S_V = \sum_1^2 \left[h P \left(\frac{\Delta\beta}{\Delta\alpha} \right)^2 + \frac{J \Delta\alpha n}{h n n'} \right] \frac{\Delta\beta}{\Delta\alpha}.$$

Из рассмотрения (2.9) следует, что $S_{II} = S_{III} = S_V = 0$, так как у концентрических систем в случае расположения входного зрачка в центре кривизны поверхностей $\Delta\beta = 0$.

В (2.9) α и β - углы первого и второго парааксиальных лучей с оптической осью; J - инвариант Лагранжа-Гельмгольца; h - высоты пересечения первого парааксиального луча с зеркалами.

Можно найти условие коррекции сферической аберрации третьего порядка $S_I = 0$.

В начале рассматривается случай, когда предмет располагается на бесконечности.

Вводятся условия нормирования: $\alpha_1 = 0$, $\alpha' = 1$, $h_1 = f' = 1$, $J = -1$, $\beta_1 = 1$, $n_1 = 1$, $n_2 = -1$, $n_3 = 1$.

Раскрывают выражение первой суммы Зейделя:

$$S_I = \sum_1^2 h \left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta \frac{1}{n}} \right)^2 \Delta\alpha \frac{1}{n} = \frac{1}{2} \left[\alpha_2^2 + (1 - d\alpha_2)(1 - \alpha_2)^2(1 + \alpha_2) \right], \quad (2.10)$$

$$\text{где } \alpha_2 = \frac{2}{\bar{r}_1} = \frac{1}{1-k}, \quad d = \frac{2}{\alpha_2} \frac{k-1}{k}.$$

Подставляя эти значения α_2 и d в (2.10), получают:

$$S_I = \frac{1}{4(1-k)^3} \left[\left(\frac{2}{k} - 1 \right) k^2 (2-k) - 1 \right] = 0 \text{ или}$$

$$\bar{S}_I = \frac{(2-k)^2 k - 1}{4(1-k)^3}, \quad (2.11)$$

откуда следует, что $S_I = 0$ при $k = 0.382$.

Таким образом, при отношении $\frac{r_1}{r_2} = 0.382$ в двухзеркальном концентрическом объективе сферическая аберрация третьего порядка отсутствует, так как $S_I = 0$.

Следовательно, все монохроматические аберрации третьего порядка

могут быть исправлены $S_{II} = S_{III} = S_V = S_I = 0$.

Вопрос об исправлении кривизны поверхности изображения будет рассмотрен ниже.

Можно определить условие исправления сферической aberrации 3-го порядка в общем случае расположения плоскости предмета $s' \neq \infty$.

Вводятся условия нормирования: $\alpha_1 = \beta^x$, $\alpha' = 1$, $h_1 = s\beta^x$, $\beta_1 = 1$.

Раскрыв выражение $S_I = \sum_1^2 h \left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta\frac{1}{n}} \right)^2 \Delta\alpha \frac{1}{n}$, имея в виду, что

$\alpha_2 = \beta^x + \frac{s\beta^x}{(1-k)}$, после преобразования и упрощения находят приближенное

значение $K = \frac{r_1}{r_2}$, при котором $S_I = 0$:

$$K = 0.382 + 0.66\beta^x. \quad (2.12)$$

Это выражение справедливо при изменении увеличения в диапазоне $\beta^x = 0 \div (-0.1)^x$.

В диапазоне изменения увеличения $\beta^x = -10^x \div -100^x$:

$$K = 2.618 + \frac{5}{\beta^x}. \quad (2.13)$$

В таблицах 2.1 и 2.2 приведены числовые значения $K = f(\beta)$.

Таблица 2.1

β^x , крат	0	-0.01	-0.02	-0.025	-0.05	-0.10
$K = \frac{r_1}{r_2}$	0.382	0.375	0.369	0.366	0.349	0.315

Таблица 2.2

β^x , крат	∞	-100	-50	-40	-20	-10
$K = \frac{r_1}{r_2}$	2.618	2.667	2.710	2.732	2.865	3.175

Раскрыв выражение S_{IV} , определяющее кривизну поверхности для двухзеркального концентрического объектива: $S_{IV} = -\sum_1^2 \frac{\Delta\frac{1}{n}}{r}$, имея в виду, что

(2.8):

$$r_1 = 2(1-k)f', \quad r_2 = \frac{2(1-k)}{k}f', \quad n_1 = 1, \quad n_2 = -1, \quad n_3 = 1. \quad (2.14)$$

Раскрыв эти значения, получим $S_{IV} = \frac{1}{f'}$, а приведенная величина $\bar{S}_{IV} = 1$.

2.3. Двухзеркальные объективы из асферических поверхностей второго порядка

Использование свойств кривых второго порядка и теории aberrации третьего порядка позволило синтезировать целый ряд оптических систем.

На рисунке 2.3 представлены некоторые принципиальные оптические схемы, содержащие параболоидальные, эллипсоидальные и гиперболоидальные отражающие поверхности.

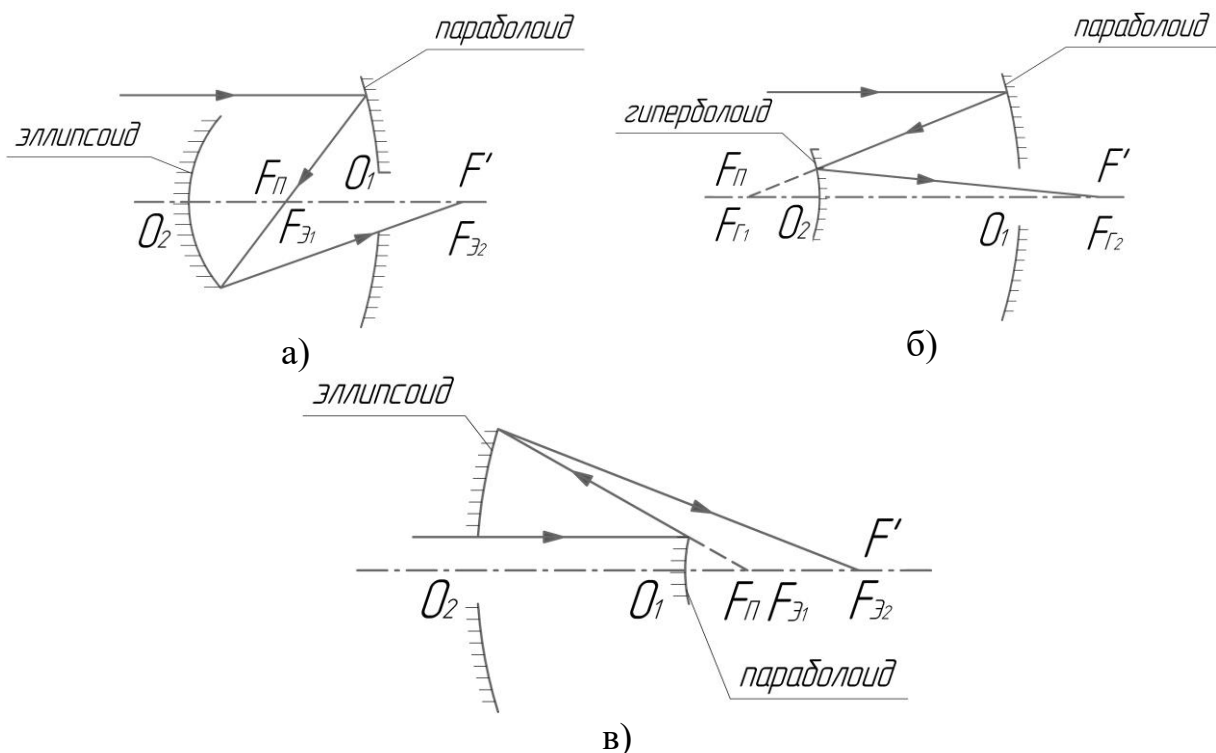


Рисунок 2.3 - Принципиальные оптические схемы:

а) объектив Грегори, б) объектив Кассегрена, в) реверсивный телеобъектив

Из рассмотренных оптических схем объективов вытекает, что изображение бесконечно удаленного предмета совпадает в случае (а) и (в) с первым фокусом эллипсоида, а затем в фокусе всего объектива. В случае (б) изображение после отражения от параболоида совпадает с первым фокусом гиперболоида, а затем в фокусе всего объектива. Во всех случаях

гомоцентричность пучков для точки на оси не нарушается.

При расчете данных объективов можно воспользоваться формулами, приведенными в 1.2, 1.3 и 1.4.

Имея в виду, что для параболоида $f' = s'_0 = \frac{r_0}{2}$.

У эллипсоида - $s_{F_1} = \frac{r_0}{1-e}$, $s'_{F_2} = \frac{r_0}{1+e}$, $2c = 2r_0 \left(\frac{e}{1-e^2} \right)$.

У гиперboloида - $s_{F_1} = -\frac{r_0}{1-e}$, $s'_{F_2} = \frac{r_0}{1+e}$, $2c = r_0 \left(\frac{e}{e^2-1} \right)$.

Где r_0 - радиус при вершине; e - эксцентриситет; $2c$ - расстояние между фокусами.

Расчет двухзеркальных объективов с асферическими поверхностями второго порядка

Расчет объектива Грегори (рис.2.3 (а))

Заданы f' и s' .

1. Задаваясь величиной эксцентриситета эллипса e , определяют линейное увеличение:

$$\beta_{\text{Э}} = -\frac{(1+e)}{(1-e)}.$$

2. Находят радиус при вершине эллипса:

$$r_{0\text{Э}} = s'(1-e).$$

3. Находят радиус при вершине параболоида:

$$r_{0\text{П}} = -2f' \frac{(1-e)}{(1+e)}.$$

4. Находят расстояние между вершинами параболоида и эллипса:

$$d = -\frac{r_{0\text{Э}}}{1+e} - \frac{r_{0\text{П}}}{2} = -\left[s'(1-e) + 2f' \frac{(1-e)}{(1+e)} \right].$$

Расчет объектива Кассегрена (рис. 2.3 (б))

Заданы f' и s' .

1. Задаваясь величиной эксцентриситета гиперboloида e , находят линейное увеличение:

$$\beta_{\text{Г}} = \frac{e+1}{e-1}.$$

2. Находят радиус при вершине параболоида:

$$r_{0\text{П}} = -2f' \frac{(1-e)}{(1+e)}.$$

3. Находят радиус при вершине гиперболоида:

$$r_{0Г} = s'(e + 1).$$

4. Находят расстояние между вершинами параболоида и эллипса:

$$d = \frac{r_{0П}}{2} - S_{Г} = \frac{r_{0П}}{2} - \frac{r_{0Г}}{e - 1}.$$

Расчет реверсивного телеобъектива (рис. 2.3 (в))

Заданы f' и s' .

1. Задаваясь величиной эксцентриситета эллипса e , определяют линейное увеличение:

$$\beta_{Э} = -\frac{(1 + e)}{(1 - e)}.$$

2. Находят радиус при вершине эллипса:

$$r_{0Э} = s'(1 - e).$$

3. Находят радиус при вершине параболоида:

$$r_{0П} = 2f' \frac{(1 - e)}{(1 + e)}.$$

4. Находят расстояние между вершинами параболоида и эллипсоида:

$$d = \frac{(1 - e)}{(1 + e)}(f' - s').$$

2.4. Сферическое зеркало и плоскопараллельная пластинка

Для компенсации сферической aberrации сферического зеркала может быть использована плоскопараллельная пластинка, как известно, вогнутое сферическое зеркало имеет отрицательную сферическую aberrацию, а плоскопараллельная пластинка положительную рис. 2.4:

$$\begin{aligned} \Delta s'_3 &= -\frac{r}{16} \operatorname{tg}^2 \sigma'; \\ \Delta s'_{nl} &= \frac{1}{2} \frac{(n^2 - 1)}{n^3} d \operatorname{tg}^2 \sigma', \end{aligned} \quad (2.15)$$

где $\Delta s'_3$ - сферическая aberrация третьего порядка вогнутого зеркала; r - радиус кривизны зеркала; σ' - апертурный угол; $\Delta s'_{nl}$ - сферическая aberrация третьего порядка плоскопараллельной пластинки; d_{nl} - толщина пластинки; n - показатель преломления.

Условием устранения сферической aberrации зеркала является:

$$\Delta s'_{nl} = -\Delta s'_3, \text{ или } \frac{1}{2} \frac{(n^2 - 1)}{n^3} d \operatorname{tg}^2 \sigma' = \frac{r}{16} \operatorname{tg}^2 \sigma', \quad (2.16)$$

откуда $d_{пл} = \frac{r}{8} \frac{n^3}{(n^2 - 1)}$ (2.17)

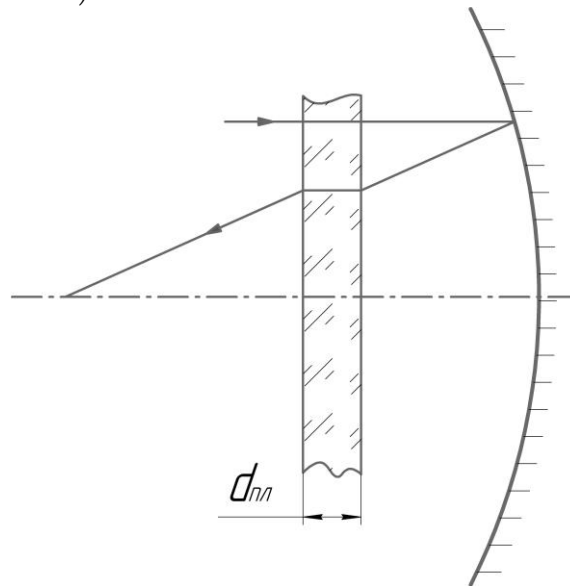


Рисунок 2.4 - Сферическое зеркало и плоскопараллельная пластинка

Следует отметить, что пластинка располагается в сходящемся пучке лучей (после отражения от зеркала). Она вносит хроматические aberrации и не корригирует другие монохроматические aberrации.

2.5. Сферическое зеркало и мениск

Для компенсации сферической aberrации сферического зеркала может быть использован мениск рис. 2.5.

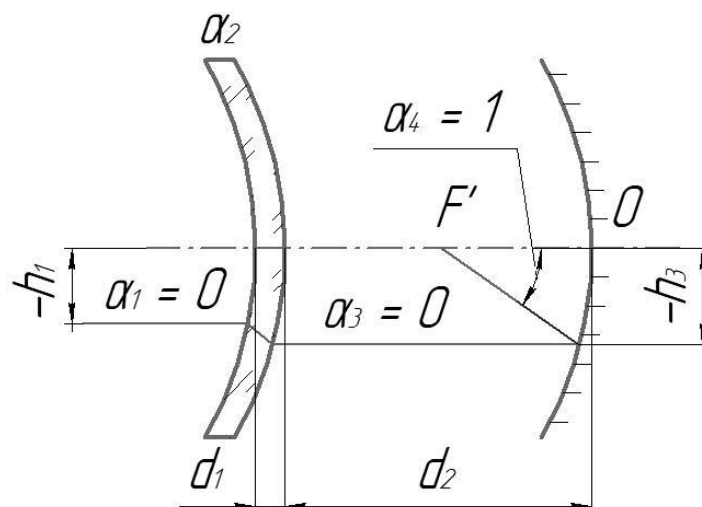


Рисунок 2.5 - Сферическое зеркало и мениск

Менисковая линза не строго афокальная, имеет небольшую

отрицательную оптическую силу, поэтому вносит в систему положительную сферическую абберацию.

Одним из требований, предъявляемых к мениску, является его ахроматизация.

Для этого необходимо, чтобы $S_{I_{xp}} = 0$ при $\alpha_1 = 0$, $\alpha_4 = 1$, $h_1 = f'$:

$$S_{I_{xp}} = \sum_1^2 hC = h_1C_1 + h_2C_2 = -h_1 \frac{\alpha_2}{v_2} - h_2 \frac{\alpha_3 - \alpha_2}{v_2} = \frac{1}{v_2} [(h_1 - h_2)\alpha_2 + h_2\alpha_3] = 0, \quad (2.18)$$

где $C = \frac{\Delta\alpha}{\Delta \frac{1}{n}} \Delta \frac{dn}{n}$, $dn = n_{\lambda_2} - n_{\lambda_1}$, $h_2 = h_1 - \alpha_2 d_1$, $v = \frac{n-1}{n_{\lambda_2} - n_{\lambda_1}}$.

$$S_{I_{xp}} = -\frac{1}{v_2} [d_1\alpha_2^2 - d_1\alpha_3\alpha_2 + f'\alpha_3] = 0$$

$$\text{Откуда } \alpha_2 = \frac{\alpha_3}{2} \pm \sqrt{\frac{\alpha_3^2}{4} - \frac{f'\alpha_3}{d_1}}. \quad (2.19)$$

Пусть фокусное расстояние мениска равно f'_M , тогда

$$\alpha_3 = \frac{h_1}{f'_M} = \frac{f'}{f'_M}. \quad (2.20)$$

Из (2.19) и (2.20) получают, что

$$f'_M = \frac{f'(d_1\alpha_2 - f')}{d_1\alpha_2^2}. \quad (2.21)$$

В (2.21) не входят величины n и v , следовательно, при соблюдении этого условия мениск будет ахроматизован для всех длин волн при любых марках стекла.

Сферическая абберация всей системы будет равна нулю, если $S_I = 0$, то есть

$$S_I = \sum_1^3 hP = h_1P_1 + h_2P_2 + h_3P_3 = 0, \quad (2.22)$$

где

$$P_1 = \frac{\alpha_2^3 \frac{1}{n}}{\left(1 - \frac{1}{n}\right)^2};$$

$$P_2 = \left(\frac{\alpha_3 - \alpha_2}{1 - \frac{1}{n}}\right)^2 \left(\alpha_3 - \alpha_2 \frac{1}{n}\right); \quad (2.23)$$

$$P_3 = -\frac{(1-\alpha_3)^2}{4}(1+\alpha_3);$$

$$h_1 = f'; \quad h_2 = h_1 - d_1\alpha_2 = f' - \alpha_2 d_1; \quad h_3 = h_2 - \alpha_3 d_2.$$

Подставляя эти величины в (2.22), находят α , а затем и радиусы мениска.

Более подробно с расчетом компенсирующего мениска можно ознакомиться в [10, 12].

2.6. Двухлинзовый афокальный компенсатор

В этом компенсаторе (рис. 2.6) обе линзы (одна положительная, другая отрицательная) выполнены из одной марки стекла, поэтому он свободен от обеих хроматических аберраций.

Можно определить основные параметры.

Пусть $\alpha_1 = \alpha_5$, $n_1 = n_3 = n_5 = 1$, $n_2 = n_4 = n$, $d_1 = d_2 = d_3 = 0$.

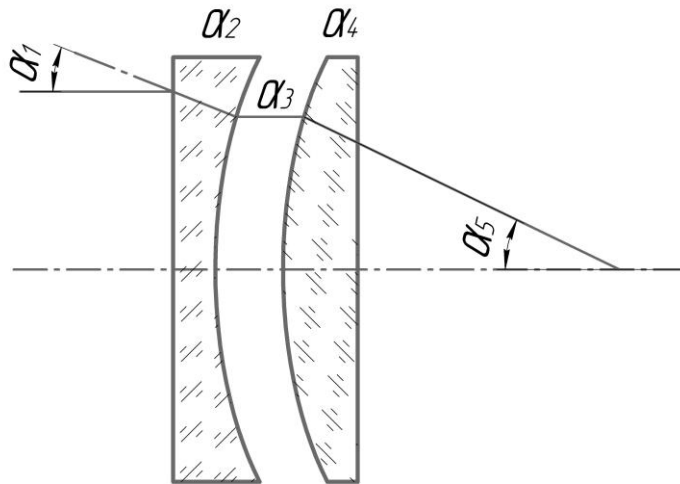


Рисунок 2.6 - Оптическая схема афокального компенсатора

$$W = \sum_1^4 \frac{\Delta\alpha}{\Delta \frac{1}{n}} \Delta\alpha \frac{1}{n} = \frac{n+1}{n-1} (\alpha_4 - \alpha_1)(\alpha_3 - \alpha_2);$$

$$P = \sum_1^4 \left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta \frac{1}{n}} \right)^2 \Delta\alpha \frac{1}{n} = \frac{n}{(n-1)^2} (\alpha_4 - \alpha_1)(\alpha_3 - \alpha_2) [(2n-1)(\alpha_3 + \alpha_1) - (2+n)(\alpha_4 + \alpha_2)];$$

$$\pi = \sum_1^4 \frac{1}{n} \frac{\Delta\alpha n}{\Delta n'} = 0; \tag{2.24}$$

$$C = \sum_1^4 \frac{\Delta\alpha}{\Delta \frac{1}{n}} \Delta \frac{dn}{n} = 0.$$

Отмечая, что

$$\frac{P}{W} = \frac{n}{n^2 - 1} [(2n - 1)(\alpha_3 + \alpha_1) - (2 + n)(\alpha_4 + \alpha_2)]. \quad (2.25)$$

Решая уравнения (2.25) относительно α_2 и α_4 , получают:

$$2\alpha_2 = \frac{2n + 1}{2 + n}(\alpha_3 + \alpha_1) - \frac{n^2 - 1}{n(2 + n)} \frac{P}{W} - \frac{(n - 1)W}{(n + 1)(\alpha_3 - \alpha_1)};$$

$$2\alpha_4 = \frac{2n + 1}{2 + n}(\alpha_3 + \alpha_1) - \frac{n^2 - 1}{n(2 + n)} \frac{P}{W} - \frac{(n - 1)W}{(n + 1)(\alpha_3 - \alpha_1)}.$$

Если компенсатор находится перед зеркальной частью $\alpha_1 = \alpha_5 = 0$, уравнения (2.24) принимают вид:

$$\bar{W} = \frac{n + 1}{n - 1}(\alpha_4 - \alpha_2)\alpha_3;$$

$$\bar{P} = \frac{\alpha_3 n}{(n - 1)^2}(\alpha_4 - \alpha_2)[(2n - 1)\alpha_3 - (2 + n)(\alpha_4 + \alpha_2)].$$

Из (2.25) следует, что если $\bar{W} = 0$, то и \bar{P} должно быть равным нулю, а если $\bar{P} = 0$, то \bar{W} может быть любым.

Числовые значения \bar{W} и \bar{P} определяются из условия коррекции остаточных аберраций зеркальной части объектива.

Придавая α_3 ряд значений и выбрав марку стекла, решая уравнения (2.24), находят α_2 и α_4 , а затем и радиуса.

Следует отметить, что афокальный двухлинзовый компенсатор, в зависимости от его расположения в оптической системе, позволяет компенсировать монохроматические аберрации зеркальной части.

Обычно при расположении компенсатора в параллельных пучках исправлению подлежат сферическая аберрация и кома зеркальной части.

Более подробные сведения о расчете двухлинзового афокального компенсатора можно найти в [10].

2.7. Компенсатор кривизны поверхности изображения

Для компенсации кривизны поверхности изображения отражающих поверхностей может быть использован апланатический, анастигматический мениск с увеличением в 1^x рис. 2.7.

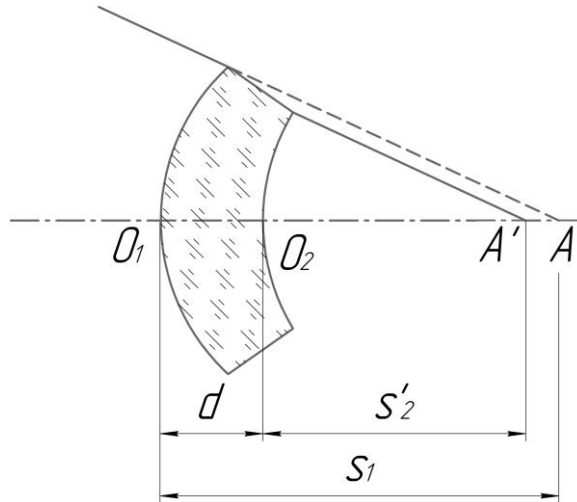


Рисунок 2.7 - Апланатический, анастигматический компенсатор кривизны поверхности изображения

Особенностью этого мениска является то, что обе его поверхности апланатические третьего рода, поэтому он не вносит сферической aberrации, комы и астигматизма третьего порядка.

Его конструктивные элементы определяются следующим образом:

$$r_1 = \frac{s_1}{1+n}; \quad \beta = 1^x;$$

$$d = \frac{s_1}{n} + \frac{1}{n \left[S_{IVM} \frac{n}{(n^2-1)} - \frac{1}{s_1} \right]}; \quad s'_2 = n \left(\frac{s_1}{n} - d \right); \quad (2.26)$$

$$r_2 = \frac{n}{n+1} \left(\frac{s_1}{n} - d \right),$$

где r_1 и r_2 - радиусы кривизны поверхностей; d - толщина мениска; n - показатель преломления; S_{IVM} - четвертая сумма Зейделя мениска.

Для устранения кривизны поверхности зеркала, у которого величина $S_{IV3} = 1$ или $S_{IV} = \frac{1}{f'_3}$, необходимо, чтобы $S_{IVM} = -S_{IV3}$ или $S_{IVM} = -\frac{1}{f'_3}$.

Однако введение мениска в систему вносит хроматические aberrации.

2.8. Компенсаторы хроматических aberrаций

Для компенсации хроматических aberrаций в зеркально-линзовых системах может быть использована гиперхроматическая линза (одна или две) (рис. 2.8) [2, 7], представляющая собой плоскопараллельную пластинку, склеенную из хроматической пары стекол, у которых показатели преломления для основной длины волны, например спектральной линии e или d , близки, а коэффициенты средней дисперсии (число Аббе) существенно

различаются. Благодаря чему "хроматическая" поверхность склейки не оказывает влияния на ход лучей основной длины волны.

Введение в оптические системы гиперхроматической линзы при небольших полевых углах и числовой апертуре не нарушает коррекции монохроматических aberrаций, но может существенно повлиять на состояние коррекции хроматических aberrаций системы.

Для коррекции обеих хроматических aberrаций - хроматизма положения и хроматизма увеличения - необходимо воспользоваться двумя гиперхроматическими линзами, расположенными друг от друга на конечном расстоянии (рис. 2.8, б).

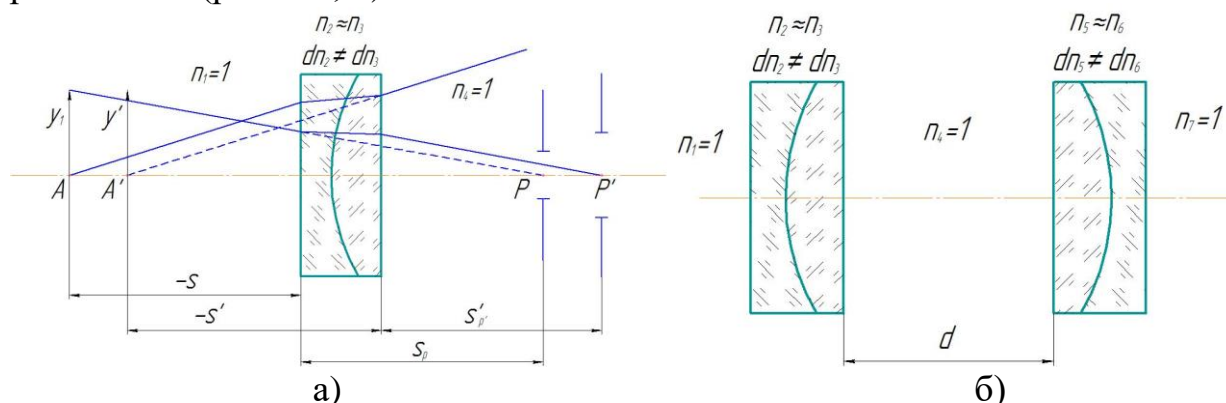


Рисунок 2.8 – Компенсатор хроматических aberrаций: а) в виде одной гиперхроматической линзы; б) в виде двух гиперхроматических линз

В случае применения в оптической системе апланатического, анастигматического компенсатора кривизны, для его ахроматизации следует ввести "хроматическую" поверхность склейки.

В качестве хроматических пар стекол следует использовать следующие марки стекол таблицы 2.2.

Таблица 2.2

Марка стекла	n_e	n_d	ν_d	ρ_d
СТК9	1.7460	1.7424	50.2	0.706
ТФ4	1.7462	1.7398	28.0	0.720
ТК16	1.6152	1.6126	58.0	0.705
ТК14	1.6155	1.6130	60.0	0.704
Ф1	1.6169	1.6168	37.0	0.715
Флюорит	1.43496	1.43385	95.1	0.706
ОК4	1.44850	1.44730	92.0	0.702
ЛК1	1.44138	1.43980	68.8	0.703

Различают хроматические компенсаторы с нормальным распределением

дисперсией, когда у флинтовой линзы число Аббе меньше, чем у кроновой линзы. И, наоборот, при аномальном распределении дисперсии у кроновой линзы число Аббе меньше, чем у линзы флинта. Варьируя гиперхроматическими линзами с нормальным и аномальным распределением дисперсий и расстоянием между ними, можно исправить обе хроматические aberrации.

Следует заметить, что в случае, если толщинами линз можно пренебречь, то между хроматическими aberrациями и обратной величиной хроматического радиуса существует линейная зависимость: $ds'_{xp} = f(\rho_{xp})$ и $dy'_{xp} = f(\rho_{xp})$, что практически удобно при определении необходимого значения хроматического радиуса $r_{xp} = \frac{1}{\rho_{xp}}$.

2.9. Модульный принцип проектирования зеркально-линзового объектива

Сущность модульного принципа заключается в том, что объектив синтезируется из оптических модулей (элементов, компонентов) с известными aberrационными свойствами.

При расчете зеркально-линзового объектива в качестве базовой принята двухзеркальная концентрическая система, для которой, в случае расположения входного зрачка в центре кривизны, все монохроматические aberrации третьего порядка, кроме кривизны поверхности S_{IV} , могут быть исправлены $S_I = S_{II} = S_{III} = S_{IV} = 0$.

В общем случае расположения предмета относительно объектива $s_1 \neq \infty$, $\beta \neq 0$, конструктивные элементы определяются по (2.27):

$$\begin{aligned}
 r_1 &= 2(1-k)f'; \\
 r_2 &= \frac{2(1-k)}{k}f'; \\
 d &= -\frac{2(1-k)^2}{k}f'; \\
 s_1 &= \left[\frac{1-\beta}{\beta} + 2(1-k) \right] f'; \\
 s'_2 &= \left[1-\beta + \frac{2(1-k)}{k} \right] f'; \\
 t'_1 &= (3-\beta-2k)f'; \\
 t_2 &= \left[\frac{1-\beta}{\beta} + \frac{2(1-k)}{k} \right] f';
 \end{aligned} \tag{2.27}$$

$$L = \frac{(\beta - 1)^2}{\beta} f';$$

$$\Theta_{\phi} = \frac{1 - \beta(2k - 1)}{3 - 2k}.$$

В случае расположения предмета на бесконечности: $s_1 = \infty$ и $\beta = 0$:

$$s'_2 = \frac{2(1 - k)}{k} f';$$

$$\Theta_{\phi} = \frac{1}{3 - 2k}; \tag{2.28}$$

$$t'_1 = (3 - 2k)f';$$

$$k = \frac{r_1}{r_2}.$$

В результате проведенных исследований на основе теории аберраций третьего порядка найдены приближенные уравнения для определения величины $k = \frac{r_1}{r_2}$, при которой $S_I = 0$, то есть сферическая аберрация исправлена.

При изменении увеличения β от 0 до -0.2^x : $k = 0.382 + 0.660\beta$.

При изменении увеличения β от -10^x до -100^x : $k = 2.618 - \frac{5}{\beta}$.

При $\beta = 0$ - $s_1 = \infty$, а $k = 0.382$.

Таким образом, в соответствии с техническим заданием, в начале определяется коэффициент $k = \frac{r_1}{r_2}$, а затем конструктивные элементы r_1 , r_2 и d .

Далее выясняется действительное состояние коррекции сферической аберрации. В случае необходимости ее коррекции из-за присутствия аберрации высшего порядка необходимо изменение коэффициента k в небольших пределах. При этом остальные аберрации остаются исправленными.

Затем необходимо перейти к исправлению кривизны поверхности изображения. Это можно выполнить путем введения в оптическую схему апланатического мениска с увеличением $\beta = 1^x$. Особенностью такого объектива является то, что его обе поверхности являются апланатическими третьего рода. Величина четвертой суммы Зейделя зеркальной части объектива $S_{IVm} = 1$.

Таким образом, величина S_{IVm} должна быть равна S_{IVz} , но с противоположным знаком.

Конструктивные элементы мениска-компенсатора кривизны

вычисляются по (2.29):

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{s}{n+1}; \\ d &= \frac{s}{n} + n \left[S_{IV} \frac{n}{n^2-1} - \frac{1}{s} \right]^{-1}; \\ r_2 &= \frac{n}{n+1} \left(\frac{s}{n} + d \right), \end{aligned} \quad (2.29)$$

где $S_{IVm} = -\frac{1}{f'}$, f' - фокусное расстояние зеркальной части.

Для коррекции хроматических aberrаций, внесенных мениском, могут быть использованы гиперхроматические линзы, расположенные перед зеркальной частью объектива или использование в апланатическом мениске "хроматической" пары стекол, например СТК9-ТФ4, ТК16-Ф1.

Путем интерполяции радиуса "хроматической" поверхности добиваются необходимой коррекции хроматической aberrации.

2.10. Методика расчета линзовых систем с асферическими поверхностями второго порядка

Расчет однокомпонентных объективов

У двухлинзовых склеенных объективов обычно коррекции подлежат сферическая aberrация, кома и хроматизм положения. У объективов, линзы которых образованы только сферическими поверхностями, относительное отверстие не превышает $D/f' = 1:5 \div 1:4$.

Введение одной асферической поверхности второго порядка позволяет увеличить относительно отверстие до $D/f' = 1:2,5 \div 1:2$ и при этом улучшить коррекцию aberrаций.

Расчет выполняется в следующей последовательности.

В качестве исходной оптической схемы однокомпонентного объектива целесообразно выбрать плосковыпуклую линзу, обращенную выпуклой поверхностью к плоскости предмета, из оптического материала с показателем преломления $n = 1,6 \div 1,7$.

В табл. 2.3 приведена зависимость параметров P и W от формы и показателя преломления линзы n .

Таблица 2.3

Форма линзы	$\alpha_1=0 \quad \alpha_2=1/n$		$\alpha_1=0 \quad \alpha_2=1/(2n)$		$\alpha_1=0 \quad \alpha_2=0$	
	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

У такой линзы, как видно из табл. 2.3, сферическая aberrация близка к минимуму, а кома - к нулю. При $n = 1,6 \div 1,65$ $\bar{W} \approx 0$, $\bar{P} = 1,5 \div 1,6$.

Продольная сферическая aberrация третьего порядка определяется следующим выражением:

$$\Delta s' = -\frac{1}{2} f t g^2 \sigma \bar{S}_1 = -\frac{1}{2} f t g^2 \sigma \bar{P};$$

$$\Delta y'_k = 3y' \eta;$$

$$\eta = \frac{1}{2} f t g^2 \sigma \bar{S}_2;$$

$$\bar{S}_2 = \bar{H}\bar{P} + \bar{W};$$

при $\bar{H} = 0$ (зрачок совпадает с компонентом),

$$\eta = \frac{1}{2} f t g^2 \sigma \bar{W}.$$

Поэтому в качестве исходной системы выбирается линза из стекла ТК14 ($n_e = 1,6155$) или ТК16 ($n_e = 1,6152$).

Определяется радиус первой выпуклой поверхности:

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

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

Последняя поверхность объектива выполняется плоской.

Для коррекции сферической абберации первая (выпуклая) 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.

Для асферической поверхности:

$$\bar{S}_{1A} = \bar{P} + \Delta\bar{P}_A = \bar{P}_A,$$

$$\text{где } \Delta\bar{P}_A = \frac{(\alpha'n' - \alpha n)^3}{(n' - n)} b, \text{ где } b = -e^2.$$

Следует заметить, что деформация поверхности (e^2) влияет только на величину \bar{P}_A и не влияет на $\bar{W}_A = W$.

Для коррекции хроматических аббераций в оптическую систему объектива вводится одна или две «хроматические» поверхности, разделяющие оптические среды, у которых показатели преломления для основной длины волны близки, а коэффициенты средней дисперсии - различны.

В табл. 2.4 приведены оптические константы «хроматических» и «хроматическо-апохроматических» пар стекол.

Таблица 2.4

Марка стекла	n_e	v_e	P_e'	v_e	P_e	n_D	v_D	P_D
ОФ3	1.615730	43.89	0.514	44.33	0.461	1.612304	44.08	0.708
ТК14	1.615506	60.35	0.509	60.83	0.456	1.613002	60.58	0.704
ТК16	1.615193	58.10	0.511	58.60	0.458	1.612596	58.35	0.705
ОФ1	1.531924	51.58	0.512	52.05	0.459	1.529401	51.80	0.706
ОК1	1.523894	75.99	0.509	76.58	0.456	1.522200	76.33	0.704
ЛК1	1.441384	68.60	0.507	69.08	0.455	1.439800	68.84	0.703
ОК4	1.448503	91.57	0.507	92.04	0.455	1.447297	91.79	0.702
СаF ₂	1.434959	94.80	0.509	95.55	0.457	1.433831	95.31	0.704
ОК3	1.497165	73.96	0.504	74.35	0.451	1.495515	74.10	0.697
СТК3	1.662239	57.11	0.511	57.60	0.458	1.659395	57.35	0.705
ОФ4	1.654189	43.26	0.515	43.70	0.462	1.650498	43.45	0.709
СТК9	1.746048	50.05	0.512	50.50	0.459	1.742397	50.25	0.706
ТФ4	1.746231	27.95	0.528	28.40	0.475	1.739795	28.15	0.720

Величина «хроматического» радиус определяется из условия ахроматизации:

$$r_{xp} = -\frac{(v_1 - v_2)}{v_2}(n - 1)f',$$

где v_1 и v_2 – коэффициенты средней дисперсии стекол, n – показатель преломления линзы для средней длины волны, f' – фокусное расстояние объектива,

При расчете ахроматических объективов целесообразно применять в качестве оптических сред марки стекол - ТК14 - Ф1 или СТК9 - ТФ4. А при расчете апохроматических объективов целесообразно применять в качестве оптических сред марки стекол - ОК1-ОФ1 или ОК4-ЛК1, у которых кроме условий $n_1 \approx n_2$, $v_1 \neq v_2$ выполняется условие $P_1 \approx P_2$, где P_1 и P_2 – относительные частные дисперсии.

Далее путем интерполяции величин e^2 и «хроматического» радиуса добиваются оптимальной коррекции aberrаций объектива.

Расчет двухкомпонентных объективов

Оптическая схема таких объективов включает одиночную линзу с одной асферической поверхностью второго порядка, перед которой расположен компенсатор хроматических aberrаций. Компенсатор выполнен в виде склеенной плоскопараллельной пластинки с одной или двумя «хроматическими» поверхностями из «хроматической» или «хроматическо-апохроматической» комбинации стекол. Компенсатор не влияет на монохроматические aberrации, т.к. он расположен в параллельном ходе лучей.

Расчет одиночной линзы выполняется как в случае расчета однокомпонентного объектива, а величина «хроматического» радиуса пластинки определяется из условия ахроматизации:

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

где f' – фокусное расстояние объектива; dn_1 и dn_2 – средние дисперсии стекол пластинки; v_3 – коэффициент средней дисперсии одиночной линзы.

Расчет окуляров

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

Из рассмотрения aberrаций третьего порядка тонкого компонента вытекает [2]:

$$z'_s - z'_m = f'tg^2 \omega_1 S_3;$$

$$\Delta y'_D = -\frac{1}{2} f'tg^3 \omega_1 S_5.$$

Далее из [3] следует, что:

$$S_3 = H^2 P + 2YW + 1;$$

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

При $H = -1$:

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

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

Решая совместно эти уравнения, находят:

$$W = 2,7;$$

$$P = 4,4.$$

Наиболее близко этим требованиям удовлетворяют оптические системы в виде плоско-выпуклой линзы, обращенной плоской поверхностью к выходному зрачку [8], из стекла с показателем преломления $n = 1,6$ (табл.2.3).

Радиус первой поверхности окуляра определяется из выражения:

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

где f' – фокусное расстояние окуляра, $\bar{\Gamma}$ – видимое увеличение окуляра.

Далее, путем асферизации первой поверхности линзы и интерполяции e^2 добиваются необходимой коррекции астигматизма и дисторсии.

Хроматизм увеличения корригируется путем введения одной или двух «хроматических» поверхностей.

Расчет конденсоров

При расчете конденсоров коррекции подлежат сферическая aberrация и кома.

Поэтому при апертуре не более 0,5 этим требованиям удовлетворяет плоско-выпуклой линза, обращенная выпуклой асферической поверхностью к плоскости предмета, из стекла с показателем преломления $n = 1,6 \div 1,7$.

При более высоких апертурах оптическая схема состоит из плоско-выпуклой линзы с асферической поверхностью второго порядка с линейным увеличением $\beta = 12^x$.

Фокусное расстояние плоско-выпуклой линзы определяется из выражения:

$$f'_l = f'_k \cdot n,$$

где f'_l и f'_k – фокусные расстояния линзы и конденсора, соответственно, n – показатель преломления стекла апланатического мениска.

Примеры расчета оптических систем

Примеры расчета однокомпонентных светосильных объективов

Ахроматический объектив $f' = 100$ мм, $D/f' = 1:2,5$, $2\omega = 4^\circ$.

На рис. 2.9 приведена оптическая схема рассчитанного объектива, а в табл. 2.5 и 2.6 - приведены конструктивные параметры и aberrации точки на оси объектива, соответственно.

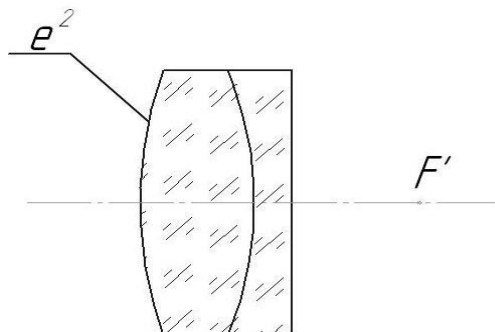


Рисунок 2.9 - Оптическая схема рассчитанного ахроматического объектива

Таблица 2.5

r , мм	d , мм	Марка стекла	n_e	ν_e
		Воздух	1.0000	
*68.24	15	СТК9	1.7460	50.00
-62.61	5	ТФ4	1.7462	28.00
800		Воздух	1.0000	

*) асферическая поверхность $e^2=0.53$

Таблица 2.6

h	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$S'_{F'} - S'_{C'}$, мм	$y'_{F'} - y'_{C'}$, мм	$tg\sigma'$
20.00	-0.015	-0.004	0.04	-0.32	-0.083	20.13
17.32	-0.002	0.000	0.03	-0.15	-0.033	17.44
14.14	0.005	0.001	0.01	0.00	0.000	14.17
10.00	0.006	0.001	0.00	0.13	0.016	10.74
0.00	0.000	0.000	0.00	0.24	0.000	0.00

Апохроматический объектив $f' = 100$ мм, $D/f' = 1:2,5$, $2\omega = 4^\circ$.

На рис. 2.10 приведена оптическая схема рассчитанного объектива, а в табл. 2.7 и 2.8 - приведены конструктивные параметры и aberrации точки на оси объектива, соответственно.

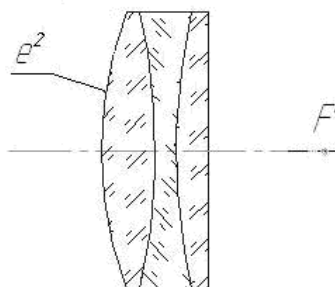


Рисунок 2.10 - Оптическая схема рассчитанного апохроматического объектива

Таблица 2.7

$r, \text{ мм}$	$d, \text{ мм}$	Марка стекла	n_e	ν_e
		Воздух	1.0000	
61.2	10	ТК14	1.6155	60.40
-44	5	ОФ3	1.6157	44.00
44	8	ТК14	1.6155	60.40
∞		Воздух	1.0000	

*) асферическая поверхность $e^2=0.585$

Таблица 2.8

h	$\Delta s', \text{ мм}$	$\Delta y', \text{ мм}$	$\eta, \%$	$S'_F - S'_C, \text{ мм}$	$W, \text{ дл. волн}$	$tg\sigma'$
20.00	-0,026	-0,003	-0,05	-0,03	-0,25	20.10
17.32	-0,027	-0,002	-0,04	-0,04	-0,19	17.74
14.14	-0,028	-0,002	-0,02	-0,06	-0,13	14.12
10.00	-0,029	-0,001	-0,01	-0,07	-0,07	10.03
0.00	0,000	0,000	0,00	-0,09	0	0.00

Примеры расчета двухкомпонентных светосильных объективов

Апохроматический объектив $f' = 100 \text{ мм}$, $D/f' = 1:2,5$, $2\omega = 4^\circ$.

На рис. 2.11 приведена оптическая схема рассчитанного объектива, а в табл. 2.9 и 2.10 - приведены конструктивные параметры и aberrации точки на оси объектива, соответственно.

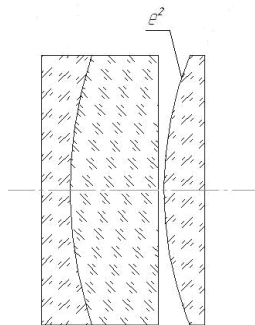


Рисунок 2.11 - Оптическая схема рассчитанного ахроматического объектива

Таблица 2.9

$r, \text{ мм}$	$d, \text{ мм}$	Марка стекла	n_e	ν_e
		Воздух	1,0000	
∞	5	ТФ4	1,7462	28,00
72	15	СТК9	1,7460	50,00
∞	1	Воздух	1,0000	
*61,3	7	ТК14	1,6155	60,00
∞		Воздух	1,0000	

*) асферическая поверхность $e^2=0,61$

Таблица 2.10

h	$tg\sigma'$	$\Delta s', \text{ мм}$	$\Delta y', \text{ мм}$	$\eta, \%$	$\Delta s'_C, \text{ мм}$	$\Delta s'_F, \text{ мм}$	$\Delta s'_G, \text{ мм}$
20,00	20,51	-0,02	-0,004	-0,042	0,039	0,046	-0,012
17,32	17,66	-0,01	-0,001	-0,036	0,053	0,057	-0,002
14,14	14,35	0,00	0,000	-0,027	0,061	0,064	0,003
10,00	10,09	0,02	0,000	-0,015	0,063	0,065	0,004
0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,062	0,063	0,000

Ахроматический объектив $f' = 100 \text{ мм}$, $D/f' = 1:2,5$, $2\omega = 4^\circ$.

На рис. 2.12 приведена оптическая схема рассчитанного объектива, а в табл. 2.11 и 2.12 - приведены конструктивные параметры и aberrации точки на оси объектива, соответственно.

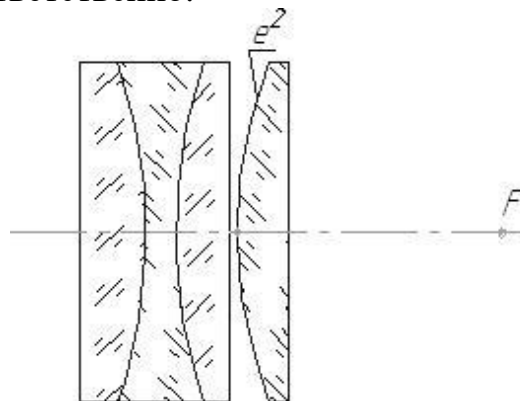


Рисунок 2.12 - Оптическая схема рассчитанного апохроматического объектива

Таблица 2.11

$r, \text{ мм}$	$d, \text{ мм}$	Марка стекла	n_e	ν_e
		Воздух	1,0000	
∞	7	ОК1	1.5239	76,00
-65	5	ОФ1	1.5319	51,60
65	7	ОК1	1.5239	76,00
∞	1	Воздух	1,0000	
*53,48	10	ОК4	1.4485	91,60
-250		Воздух	1,0000	

*) - асферическая поверхность $e^2=0,86$

Таблица 2.12

h	$tg\sigma'$	$\Delta s', \text{ мм}$	$\Delta y', \text{ мм}$	$\eta, \%$	$\Delta s'_C, \text{ мм}$	$\Delta s'_F, \text{ мм}$	$\Delta s'_G, \text{ мм}$
20,00	20,10	-0,02	-0,004	-0,027	0,001	-0,019	0,008
17,32	17,32	0,01	0,002	-0,034	0,035	0,012	0,039
14,14	14,07	0,03	0,004	-0,032	0,051	0,026	0,052
10,00	9,89	0,02	0,002	-0,021	0,047	0,021	0,046
0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,026	-0,001	0,023

Из анализа табл. 2.10, 2.12 следует, что у всех рассчитанных объективов достигнута высокая степень коррекции сферической аберрации и комы, а у апохроматических объективов коррекция вторичного спектра и сферохроматической аберрации.

Следует заметить, что кривизна поверхности и астигматизм у объективов с асферическими поверхностями такие же, как и у обычных двухлинзовых объективов.

Пример расчета окуляра

Окуляр микроскопа $\bar{\Gamma} = 10^X$, $2y' = 20$ мм.

На рис. 2.13 приведена оптическая схема рассчитанного окуляра, а в табл. 2.13 и 2.14 - приведены конструктивные элементы и аберрации главного луча окуляра с, вычисленного в обратном ходе лучей.

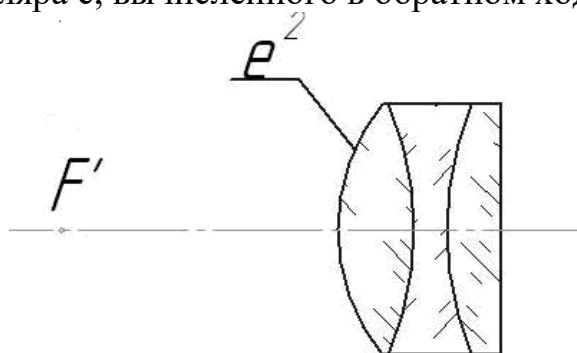


Рисунок 2.13 - Оптическая схема рассчитанного окуляра

Таблица 2.13

r , мм	d , мм	Марка стекла	n_e	ν_e
		Воздух		
*18,624	7	СТК9	1,7460	50,00
-30	3	ТФ4	1,7462	28,00
30	5	СТК9	1,7460	50,00
0		Воздух		

*) асферическая поверхность $e^2 = 1,23$

Таблица 2.14

ω	s_p , мм	$s'_{p'}$, мм	y' , мм	z'_m , мм	$z'_{s'}$, мм	$z'_s - z'_m$, мм	$\frac{\Delta y'}{y'}$, %
-21°	24,04	-170	9,718	-1,24	-1,24	0,00	1,39
-15°	22,36	-170	6,825	-0,58	-0,57	0,01	0,71
0	20,68	-170	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Из анализа аберраций следует, что достигнутая коррекция отвечает требованиям, предъявляемым к ортоскопическим и анастигматическим окулярам.

Пример расчета конденсора

Конденсор $f'=30$ мм, $A=0,75$.

На рис. 2.14 приведена оптическая схема рассчитанного конденсора, а в табл. 2.15 и 2.16 - приведены конструктивные элементы и aberrации точки на оси конденсора.

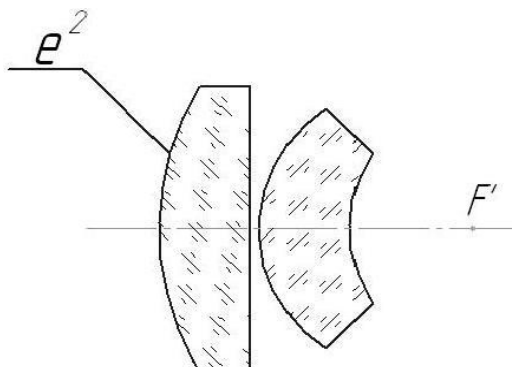


Рисунок 2.14 - Оптическая схема рассчитанного окуляра

Таблица 2.15

r , мм	d , мм	Марка стекла	n_e	ν_e
		Воздух		
*34,24	10	ТК14		
0	1	Воздух		
16,46	10	СТК9	1,7460	50,00
15,89		Воздух		

*) асферическая поверхность $e^2 = 0,60$

Таблица 2.16

h	$\text{tg}\sigma' \times 10^2$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$s'_F - s'_C$, мм
22,50	14,00	-0,08	-0,09	-0,17	-0,42
19,49	85,89	-0,04	-0,03	-0,24	-0,44
15,91	64,79	-0,01	-0,01	-0,23	-0,46
11,25	40,52	0,00	0,00	-0,15	-0,48
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,49

Из анализа таблицы видно, что конденсор с одной асферической поверхностью имеет существенно лучшую коррекцию aberrаций, при меньшем количестве линз, чем у конденсоров, рассчитанных на минимум сферической aberrации.

В заключении следует отметить, что введение в оптические системы асферических поверхностей второго порядка позволяет существенно упростить их оптические схемы, по сравнению с системами, состоящих из линз со сферическими поверхностями.

Вопросы для самоконтроля

1. Коэффициенты S_I , S_{II} , S_{III} , S_{IV} , S_V для системы из двух сферических зеркал.
2. Коэффициенты S_I , S_{II} , S_{III} , S_{IV} , S_V для двухзеркального концентрического объектива.
3. Методика расчета объектива Грегори.
4. Методика расчета объектива Кассегрена.
5. Методика расчета реверсивного телеобъектива.
6. Использование плоскопараллельной пластинки для компенсации сферической аберрации сферического зеркала.
7. Использование мениска для компенсации сферической аберрации сферического зеркала.
8. Двухлинзовый афокальный компенсатор и его свойства.
9. Компенсатор кривизны поверхности изображения и его свойства.
10. Гиперхроматическая линза и ее свойства.
11. В чем заключается сущность модульного принципа проектирования зеркально-линзового объектива?
12. Методика расчета однокомпонентных объективов с асферическими поверхностями второго порядка.
13. Методика расчета двухкомпонентных объективов с асферическими поверхностями второго порядка.
14. Методика расчета окуляров с асферическими поверхностями второго порядка.
15. Методика расчета конденсоров с асферическими поверхностями второго порядка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев Л. Н., Ежова В. В. Прикладная теория аберраций. Часть вторая. – Учебное пособие. - СПб.: НИУ ИТМО, 2011. - 52 с.
2. Андреев Л. Н., Ежова В. В. Прикладная теория аберраций. Часть первая. - СПб.: Университет ИТМО, 2020. - 104 с.
3. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. М. Государственное издание техники - теоретической литературы. 1956. 608с.
4. Вычислительная оптика. Справочник / под общей ред. Русинова М. М. – М.: URSS, 2007. – 423 с.
5. Зверев В. А. Основы геометрической оптики. - СПб.: ИТМО, 2002. - 218 с.
6. Зверев В. А., Точилина Т. В. Оплотехника проектирования оптических приборов. - СПб.: ИТМО, 2005. - 457 с.
7. Панов В. А., Андреев Л. Н. Оптика микроскопов. - Л.: Машиностроение, 1976. - 432 с.
8. Русинов М.М. Композиция оптических систем. - СПб.: Книжный дом «Либроком», 2011. - 382 с.
9. Русинов М.М. Несферические поверхности в оптике: Расчет, изготовление и контроль. Изд. стереотип. – М.: URSS, 2021. – 296 с.
10. Слюсарев Г. Г. Методы расчёта оптических систем. - Л: Машиностроение, 1989. - 379с.
11. Тудоровский А. И. Теория оптических приборов. - М.-Л.: Издательство АН СССР, ч. 1, 1948, 661 с., ч. 2, 1952, 567 с.
12. Турыгин И. А. Прикладная оптика. - М.: Машиностроение, ч. 1., 1965, 362 с., ч. 2, 1966, 431 с.
13. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов. - М. - Л.: Машиностроение, 1966. - 564 с.

Андреев Лев Николаевич
Ежова Василиса Викторовна

Прикладная теория aberrаций. Часть вторая

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А