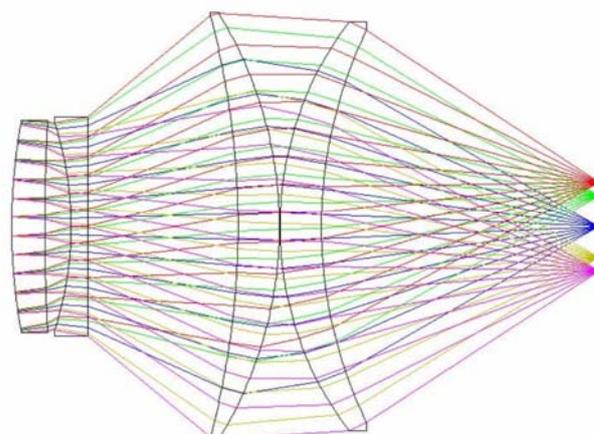
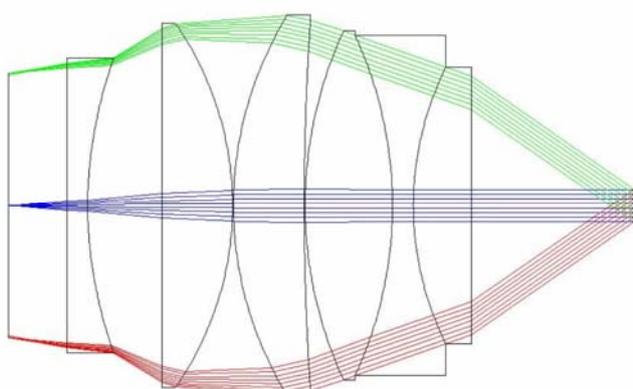
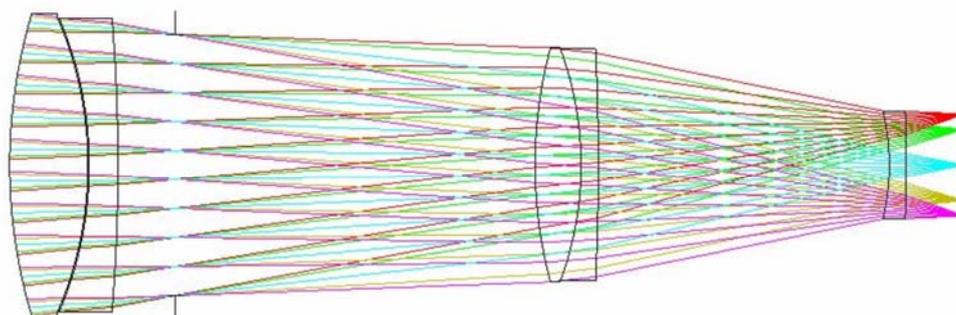
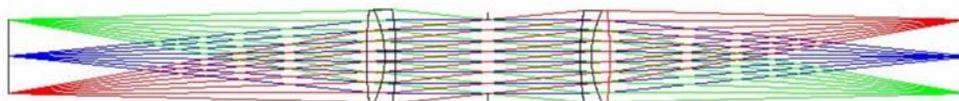


А. П. Грамматин, О.Н. Балащенко, Г.Э. Романова

# РАСЧЕТ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Учебное пособие



Санкт-Петербург  
2013

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

**А.П.Грамматин, Г.Э.Романова, О.Н. Балащенко**

**РАСЧЕТ И АВТОМАТИЗАЦИЯ  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ**

**Учебное пособие**



**Санкт-Петербург**

**2013**

А. П. Грамматин, Г. Э. Романова, О.Н. Балащенко. Расчет и автоматизация проектирования оптических систем. Учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 128 с.

В учебном пособии изложены основные методы проектирования оптических систем, а также математические основы автоматизированной коррекции оптических систем с использованием специализированного программного обеспечения. Рассматриваются примеры расчета линзовых оптических систем различного типа. Сведения, представленные в пособии, необходимы при изучении дисциплин «Расчет и автоматизация проектирования оптических систем», «Расчет оптических систем», «Методы проектирования оптических систем».

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и оптоэлектроники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки магистров 200400 «Оптоэлектроника» и 200401 «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения» (протокол № 7 от 29 ноября 2013 г.)

Рецензент: главный оптик ОАО «ГОИ им. С.И.Вавилова», начальник отделения Н05 Л.Н.Архипова



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2013

© А. П. Грамматин, Г.Э.Романова, О.Н. Балащенко, 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Обозначения, принятые в тексте .....	5
Введение.....	8
1. Понятие об aberrациях третьего порядка .....	9
1.1 Обзор aberrаций .....	11
2. Проектирование оптических систем .....	25
2.1 Этапы разработки оптической системы .....	25
2.2 Методы расчета оптических систем .....	30
2.2.1 Метод проб .....	30
2.2.2 Синтез из тонких компонентов (алгебраический метод).....	31
2.2.3 Синтез оптических систем из поверхностей с особыми свойствами (метод композиции) .....	37
3. Методы автоматизированной коррекции оптических систем ...	47
3.1 Постановка задачи .....	48
3.2 Метод Ньютона .....	49
3.3 Модифицированный метод Ньютона .....	51
3.4 Метод наименьших квадратов .....	53
3.5 Модифицированный метод наименьших квадратов .....	55
3.6 Метод градиента .....	55
3.7 Метод Лагранжа .....	56
3.8 Особенности программного комплекса для расчета оптических систем САРО (Система Автоматизированного Расчета Оптики) .....	57
3.9 Выбор корригируемых функций .....	58
3.10 Выбор коррекционных параметров .....	60
3.11 Приемы автоматизированной коррекции .....	64
3.11.1 Метод последовательной коррекции aberrаций .....	64
3.11.2 Метод целенаправленного изменения коррекционных параметров .....	68
4. Расчет оптических систем .....	72
4.1 Aberrационные свойства и расчет объектива, склеенного из двух линз .....	72
4.2 Оптимальная коррекция поперечной сферической aberrации зрительных труб .....	82
4.3 Aberrационные свойства и расчет объектива, склеенного из трех линз .....	85
4.4 Расчет и aberrационные свойства трехлинзового объектива, из которых две – склеенные .....	88
4.5 Aberrационные свойства и расчет объектива из двух линз с малым воздушным промежутком .....	89

	стр.
4.6 Окуляры зрительных труб, выполненных по схеме Кеплера. Оптические схемы и методы расчета .....	91
4.7 Расчет зрительной трубки Галилея .....	104
4.8 Расчет объектива типа Петцваля с использованием методов Г.Г. Слюсарева и М.М.Русинова .....	107
4.9 Расчет систем для ИК области спектра .....	112
Заключение .....	118
Литература .....	119
Приложение 1. ....	121
Приложение 2. ....	124

**Обозначения, принятые в тексте:**

$D$  – диаметр входного зрачка;

$K$  – диафрагменное число, то есть  $K = f'/D$ ;

$H_{\max}$  – ордината точки пересечения крайнего апертурного луча с плоскостью зрачка;

$H_i$  – ордината точки пересечения  $i$ -ого луча с плоскостью зрачка;

$i$  – номер апертурного луча в соответствии с нумерацией, принятой в программе SAPO, а именно:

$$i=1 \text{ соответствует } H_1 = D/2,$$

$$i=21 \text{ соответствует } H_{21} = D\sqrt{7/8}/2,$$

$$i=2 \text{ соответствует } H_2 = D\sqrt{3/4}/2,$$

$$i=22 \text{ соответствует } H_{22} = D\sqrt{5/8}/2,$$

$$i=3 \text{ соответствует } H_3 = D\sqrt{1/2}/2,$$

$$i=32 \text{ соответствует } H_{32} = D\sqrt{3/8}/2,$$

$$i=4 \text{ соответствует } H_4 = D\sqrt{1/4}/2,$$

$$i=42 \text{ соответствует } H_{42} = D\sqrt{1/8}/2,$$

$\Delta y'_i$  – поперечная сферическая абберация для луча с номером  $i$ ;

$\Delta s'_i$  – продольная сферическая абберация для луча с номером  $i$ ;

$\Delta s'_{III}$  – римские цифры в индексе обозначают порядок абберации: III, V – третий и пятый порядки;

$\sigma'_i$  – поперечная сферическая абберация в угловой мере для луча с номером  $i$ ;

$w_i$  – волновая абберация;

$z_p$  – положение входного зрачка относительно первой поверхности;

$z'_p$  – положение выходного зрачка относительно последней поверхности;

$\Delta z'_p$  – сферическая абберация в выходном зрачке;

$t = z_p/f'$ ,  $t' = z'_p/f'$  – относительные положения зрачков соответственно от первой и последней поверхностей;

$L$  – расстояние между предметом и изображением;

$n(\lambda)$  – показатель преломления для длины волны  $\lambda$ :

$\lambda$  – порядковый номер длины волны в соответствующей таблице программы SAPO. Для видимой области спектра рекомендуется задавать  $\lambda = 0$  – основная длина волны  $e$ ,  $\lambda = 1$  – длина волны  $C'$ ,  $\lambda = 2$  – длина волны  $F'$ . В таблице SAPO можно задавать длину волны либо буквами, либо цифрами: 0,000e или 0,0005461 (в миллиметрах);

$\eta$  – отступление от условия изопланатизма;

$\Delta y'$  – черта над обозначением означает заданное значение абберации (в данном примере поперечной) для автоматизированной коррекции;

$l_j$  – величина предмета;

$l'_j$  – ордината точки пересечения главного луча с плоскостью Гаусса;  $j$  – номер пучка в соответствии с нумерацией, принятой в программе SAPO, а именно:

$j=1$  соответствует краю поля  $\sin \omega = -MUMAX$ ,  $\omega$  – угловое поле или  $l_1 = YMAX$

$j=11$  соответствует  $\sin \omega \sqrt{7/8}$ ,  $l_1 \sqrt{7/8}$

$j=2$  соответствует  $\sin \omega \sqrt{3/4}$ ,  $l_1 \sqrt{3/4}$

$j=12$  соответствует  $\sin \omega \sqrt{5/8}$ ,  $l_1 \sqrt{5/8}$

$j=3$  соответствует  $\sin \omega \sqrt{1/2}$ ,  $l_1 \sqrt{1/2}$

$j=13$  соответствует  $\sin \omega \sqrt{3/8}$ ,  $l_1 \sqrt{3/8}$

$j=4$  соответствует  $\sin \omega \sqrt{1/4}$ ,  $l_1 \sqrt{1/4}$

$j=14$  соответствует  $\sin \omega \sqrt{1/8}$ ,  $l_1 \sqrt{1/8}$

$P^*$  – основной параметр Г.Г.Слюсарева, связанный со сферической aberrацией третьего порядка при  $s_1 = \infty$ ;

$W^*$  – основной параметр Г.Г. Слюсарева, связанный с отступлением от условия изопланатизма третьего порядка (комы) при  $s_1 = \infty$ ;

$C^*$  – основной параметр Г.Г. Слюсарева, определяющий хроматизм положения при  $s_1 = \infty$ ;

$P$  – параметр Г.Г. Слюсарева, определяющий сферическую aberrацию третьего порядка при  $s_1 \neq \infty$ ;

$W$  – основной параметр Г.Г. Слюсарева, определяющий отступление от условия изопланатизма третьего порядка (кому) при  $s_1 \neq \infty$ ;

$C$  – основной параметр Г.Г. Слюсарева, определяющий хроматизм положения при  $s_1 \neq \infty$ ;

$\alpha_1$  – угол между оптической осью и параксиальным (бесконечно близким к оси) лучом, выходящим из осевой точки предмета (первым параксиальным лучом);

$\alpha_{i+1}$  – тот же угол между поверхностями с номером  $i$  и  $i+1$ ,

$h_i$  – расстояние от оптической оси до точки преломления (отражения) первого параксиального луча – «высота» на поверхности с номером  $i$ ;

$\beta_1$  – угол между оптической осью и вторым параксиальным лучом, проходящим через осевую точку входного зрачка в пространстве предметов из внеосевой точки предмета;

$y_i$  – расстояние от оптической оси до точки преломления (отражения) второго параксиального луча на поверхности с номером  $i$ ;

$\sigma_A$  – апертурный угол в пространстве предметов;

$\sigma'_A$  – апертурный угол в пространстве изображений;

$2\omega$  – угловое поле системы в пространстве предметов;

$2\omega'$  – угловое поле системы в пространстве изображений;

$V$  – линейное увеличение;

$\Gamma$  – видимое увеличение;

$Z'_m$  – меридиональная составляющая астигматизма;

$Z'_s$  – сагиттальная составляющая астигматизма;

$Z'_p$  – кривизна поверхности изображения – стрелка Петцваля;

$l'(2-1)_j$  – хроматизм увеличения для главных лучей  $j$ -ого пучка;

$R'Y$  – радиус поверхности изображения;

$DS'Y$  – смещение плоскости установки относительно плоскости Гаусса.

Когда изображение находится на бесконечности, например, в зрительных трубах, в программе SAPO следует указывать  $DS'Y = 1E9$ , в этом случае поперечные aberrации выдаются в угловой мере, продольные aberrации – в продольной мере.

$T$  – коэффициент передачи контраста.

## **Введение**

Оптические и оптико-электронные приборы и системы применяются практически во всех областях науки и техники. С их помощью решаются задачи автоматического слежения и управления, повышения точности и быстродействия сложных комплексов и т.п.

От правильного выбора принципиальной оптической схемы и ее дальнейшего расчета во многом зависит не только успешная работа прибора в целом, но и его габариты и масса, а также объем принимаемой информации.

Несмотря на то, что в настоящее время при разработке оптических систем широко используются персональные компьютеры, для которых существуют комплексы универсальных и специализированных программ для синтеза, анализа и оптимизации систем, это не приводит к буму разработки сверхоригинальных схем, хотя и значительно ускоряет процесс создания оптических систем.

Проектирование оптических систем представляет собой достаточно сложный процесс, который включает в себя как этапы теоретического исследования, так и практические этапы, использующие возможности программ для автоматизированного проектирования оптики [1, 2]. Проектировщик должен учитывать множество факторов, в том числе технологические возможности производства разрабатываемых оптических систем, стоимость используемых материалов и возможность их поставки и др. [3, 4] Специалисты, способные квалифицированно разработать оптические системы для решения задач, поставленных перед оптико-электронным прибором, должны обладать фундаментальными знаниями по общеобразовательным и техническим дисциплинам, а также в совершенстве знать основы оптики и оптические системы приборов.

В пособии изложены основные методы синтеза оптических схем, методы автоматизированной коррекции, а также приведены примеры расчета оптических систем различного типа.

## 1. Понятие об aberrациях третьего порядка

Расчет хода меридионального луча через сферическую поверхность можно выполнить по следующим тригонометрическим формулам:

$$\sin \varepsilon = \sin \sigma \frac{r-s}{r} \quad (1.1)$$

$$\sin \varepsilon' = \frac{n}{n'} \sin \varepsilon \quad (1.2)$$

$$\sigma' - \sigma = \varepsilon' - \varepsilon \quad (1.3)$$

$$\sin \varepsilon' = \sin \sigma' \frac{r-s'}{r} \quad (1.4)$$

В формулах (1.1) – (1.4) обозначения согласно рисунку 1.1.

С помощью этих формул в прологарифмированном виде по таблицам логарифмов и ручного суммирования логарифмов осуществлялся расчет хода лучей в домашинную (докомпьютерную) эпоху (примерно до 1955 года).

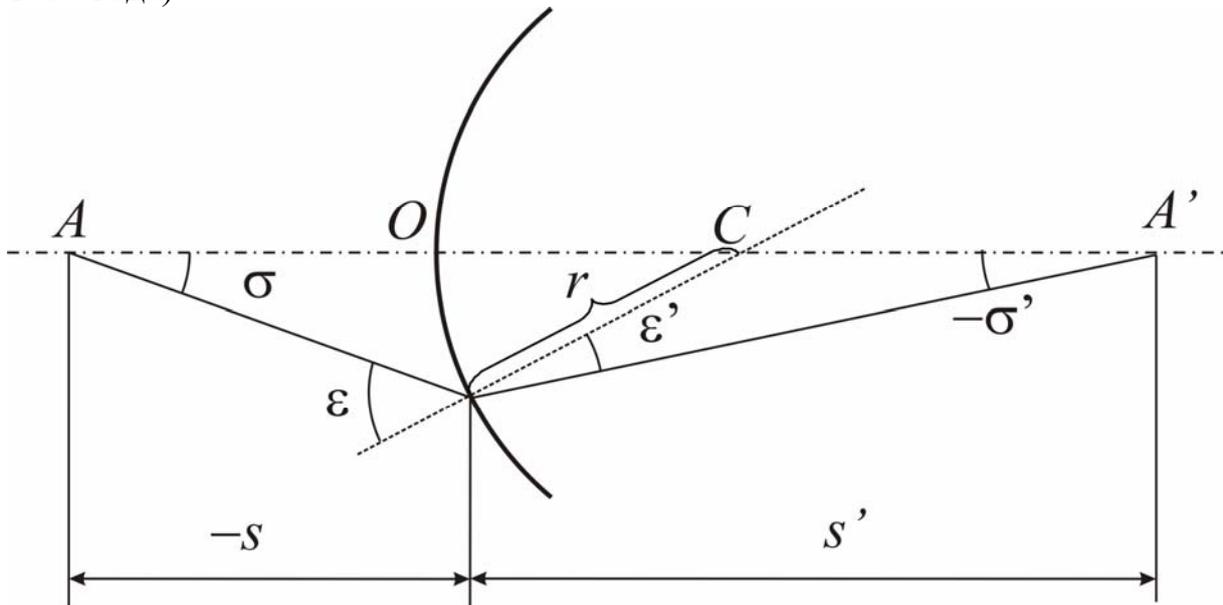


Рис. 1.1 Преломление луча через сферическую поверхность

Для расчета параксиальных (бесконечно близких к оси) лучей синусы в формулах (1.1) – (1.4) заменяются первым членом разложения этой функции в ряд  $\sin \sigma = \sigma = \alpha$ , где  $\alpha$  – угол первого параксиального луча с осью.

Выполнив несложные преобразования и введя высоту падения  $h$  первого параксиального луча на поверхность, получим формулы, удобные для практического пользования:

$$\alpha_1 = \frac{h}{s_1} \quad (1.5)$$

$$\alpha_2 = \alpha'_1 = \alpha_1 \frac{n}{n'} + \frac{h}{r} \frac{n'-n}{n} \quad (1.6)$$

$$s' = \frac{h}{\alpha'} \quad (1.7)$$

При расчете хода параксиальных лучей на компьютере также используются последние формулы, а для расчета реальных лучей – преобразованные формулы первой группы, называемые формулами Федера [2, 5], в которых вычисление синусов и арксинусов заменено двукратным извлечением квадратного корня, что существенно ускоряет работу компьютера. Формулы Федера пригодны и для расчета внемеридиональных лучей.

Логический вывод формул для aberrаций третьего порядка, зависящих от третьей степени суммы степеней координат на зрачке  $H$  и величины предмета  $l$ , можно представить следующим образом. Заменяем синусы и арксинусы в формулах (1.1) – (1.4) двухчленным разложением их в ряд, то есть примем

$$\sin \sigma \cong \sigma - \frac{\sigma^3}{6}, \quad (1.8)$$

$$\arcsin \sigma \cong \sigma + \frac{\sigma^3}{6}. \quad (1.9)$$

Из полученных в результате такого расчета координат пересечения лучей с плоскостью параксиального изображения вычтем соответствующие координаты параксиальных лучей и получим aberrации третьего порядка. Например, для продольной сферической aberrации найдем  $\Delta s' = s' - s'_0$ .

## 1.1 Обзор аберраций

### *Сферическая аберрация*

Сферическая аберрация проявляется в нарушении гомоцентричности пучка лучей при сохранении его симметрии. Ее характерным свойством является наличие и постоянство в пределах всего поля изображения, включая центр. Для определения сферической аберрации необходимо и достаточно рассчитать ход лучей осевого и параксиального пучков, поскольку в центре поля другие монохроматические аберрации отсутствуют.

В практике расчетов оптических систем используются четыре численных представления сферической аберрации:

1. Поперечная аберрация  $\Delta y'$ . Измеряется по оси  $OY$ , то есть перпендикулярно оптической оси. Моделирует визуальное восприятие изображения точки.
2. Продольная аберрация  $\Delta s'$ . Измеряется вдоль оси  $OZ$ , то есть вдоль оптической оси. Используется, главным образом, при проектировании оптических систем по частям, например, телескопических.
3. Угловая аберрация  $\sigma'$ . Является аналогом поперечной аберрации. Используется в случае, когда изображение находится на бесконечности.
4. Волновая аберрация  $w$ . Используется при расчете так называемых дифракционно-ограниченных оптических систем, то есть систем, качество изображения которых определяется дифракцией.

В программах проектирования оптики при расчете аберраций продольная, поперечная (или угловая) и волновая аберрация выдается как функция  $\operatorname{tg} \sigma'$ , то есть тангенса реального луча или как функция радиуса входного зрачка  $H$  (высоты на зрачке).

Для наглядности при оценке сферической аберрации можно рассматривать пятно рассеяния для центра поля. При наличии сферической аберрации третьего порядка и отсутствии остальных монохроматических аберраций пятно рассеяния по всему полю одинаково [6].

При наличии третьих порядков аберрации продольная сферическая аберрация зависит от второй степени координаты по зрачку, поперечная – от третьей степени, волновая – от четвертой.

При наличии сферической аберрации третьего порядка наилучшее изображение будет образовываться не в плоскости Гаусса, а в плоскости установки, смещенной на величину  $DS'Y = \Delta s'_2(0)$ , где  $\Delta s'_2(0)$  – продольная сферическая аберрация для луча с координатой на зрачке  $H_2 = 0,866H_{\max}$ . При этом поперечная аберрация на краю зрачка и на высоте  $H_4 = 0,5H_{\max}$  равны по модулю и противоположны по знаку  $\Delta y'_1(0) = -\Delta y'_4(0)$ .

На рис. 1.2 показаны графики поперечной сферической аберрации

при наличии только третьих ее порядков в плоскости Гаусса и в плоскости наилучшей установки. При этом пятно рассеяния в последнем случае уменьшается в четыре раза.

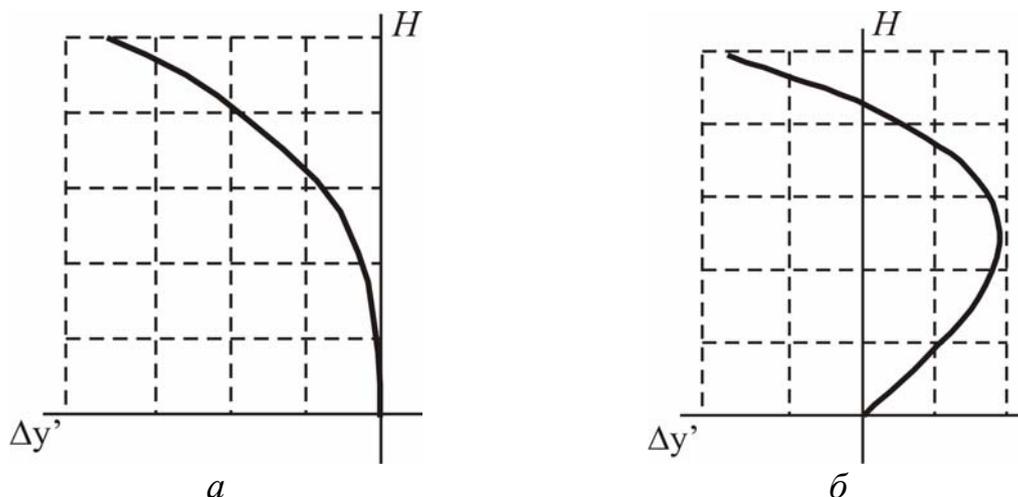


Рис. 1.2 График поперечной сферической аберрации при наличии третьих ее порядков: а) в плоскости Гаусса б) в плоскости наилучшей установки

В качестве тестовой системы, в которой присутствует только сферическая аберрация третьего порядка, можно использовать объектив «Микронар», модифицированный особым образом с целью введения сферической аберрации [7,8].

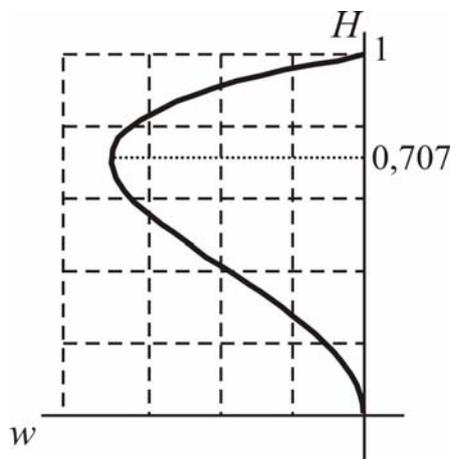


Рис. 1.3 График волновой сферической аберрации при наличии третьих ее порядков в плоскости наилучшей установки

При расчете дифракционно-ограниченных систем, в которых присутствует только сферическая аберрация третьего порядка, оптимальное смещение плоскости установки составляет  $DS'Y = \Delta s'_3(0)$ . При этом ее ход имеет вид, показанный на рис.1.3. В этом случае волновая аберрация для края отверстия равна нулю, а максимум достигается при  $H = H_3$  и составляет  $w_3 = 0,25w_1$ , где  $w_1$  – значение волновой аберрации на краю зрачка в плоскости Гаусса. При этом среднеквадратическое

отклонение волновой aberrации минимально, а число Штреля максимально.

При расчете систем, в которых присутствуют сферическая aberrация третьего и пятого порядка, можно выделить aberrации третьего и пятого порядков:

$$\Delta y'_{V} = 2\Delta y'_{1}(0) - 5,656\Delta y'_{3}(0), \quad (1.10)$$

$$\Delta y'_{III} = \Delta y'_{1}(0) - \Delta y'_{V}. \quad (1.11)$$

Анализ порядков продольной сферической aberrации может быть выполнен по формулам:

$$\Delta s'_{V} = 2\Delta s'_{1}(0) - 4\Delta s'_{3}(0); \quad (1.12)$$

$$\Delta s'_{III} = \Delta s'_{1}(0) - \Delta s'_{V} = 4\Delta s'_{3}(0) - \Delta s'_{1}(0) \quad (1.13)$$

Анализ порядков волновой сферической aberrации может быть выполнен по формулам:

$$w_{VI} = 2w_1(0) - 8w_3(0) \quad (1.14)$$

$$w_{IV} = 8w_3(0) - w_1(0) \quad (1.15)$$

### **Кома**

Аберрация, называемая комой, проявляется в нарушении симметрии меридиональных внеосевых лучей относительно главного. При наличии комы верхний и нижний лучи меридионального пучка, симметричные относительно главного луча в пространстве предметов, пересекают плоскость Гаусса в одной точке, не совпадающей с точкой пересечения главного луча с этой плоскостью. Расстояние между этими точками представляет собой меридиональную кому  $k_m$  (рис. 1.4). Лучи сагиттального пучка, симметричные относительно главного, фокусируются в точке, расположенной на расстоянии  $k_s$  от точки пересечения главного луча с плоскостью Гаусса. Величина  $k_s$  называется сагиттальной комой. В области aberrации третьего порядка для сагиттальной и меридиональной комы выполняется соотношение  $k_m/k_s=3$ .

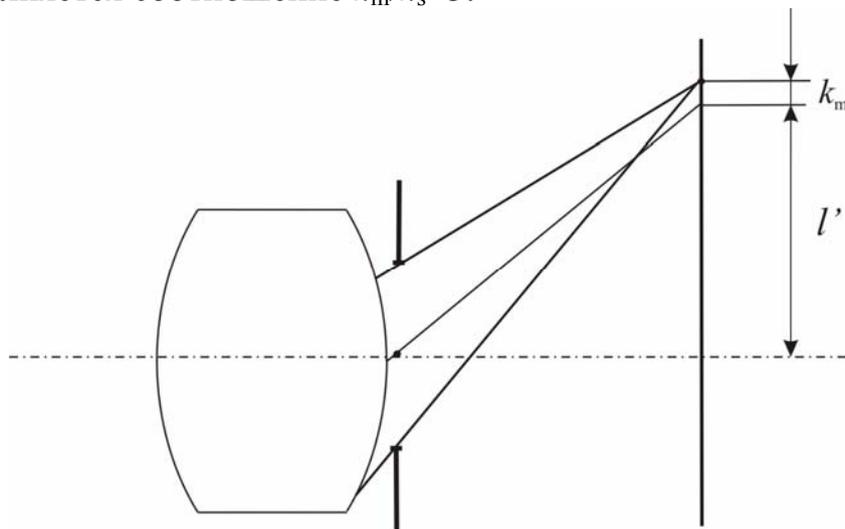


Рис. 1.4 Ход лучей в оптической системе при наличии комы

В программных комплексах расчета оптики величина комы на экран не выдётся, и для определения меридиональной комы  $k_m$  для края поля в присутствии других aberrаций необходимо произвести ее расчет по формуле:

$$k_m = (\Delta y'_{1,1} + \Delta y'_{1,8})/2, \quad (1.16)$$

где  $\Delta y'_{1,1}$  – aberrация для луча, выходящего из крайней точки предмета и проходящий через верхний край зрачка;  $\Delta y'_{1,8}$  – aberrация для луча, выходящего из крайней точки предмета и проходящий через нижний край зрачка. Меридиональная кома пропорциональна квадрату апертуры и полевому углу (или величине изображения).

Пятно рассеяния при наличии комы третьего порядка имеет характерный вид, показанный на рисунке, где  $l'$  – координата пересечения главного луча наклонного пучка с плоскостью изображения.

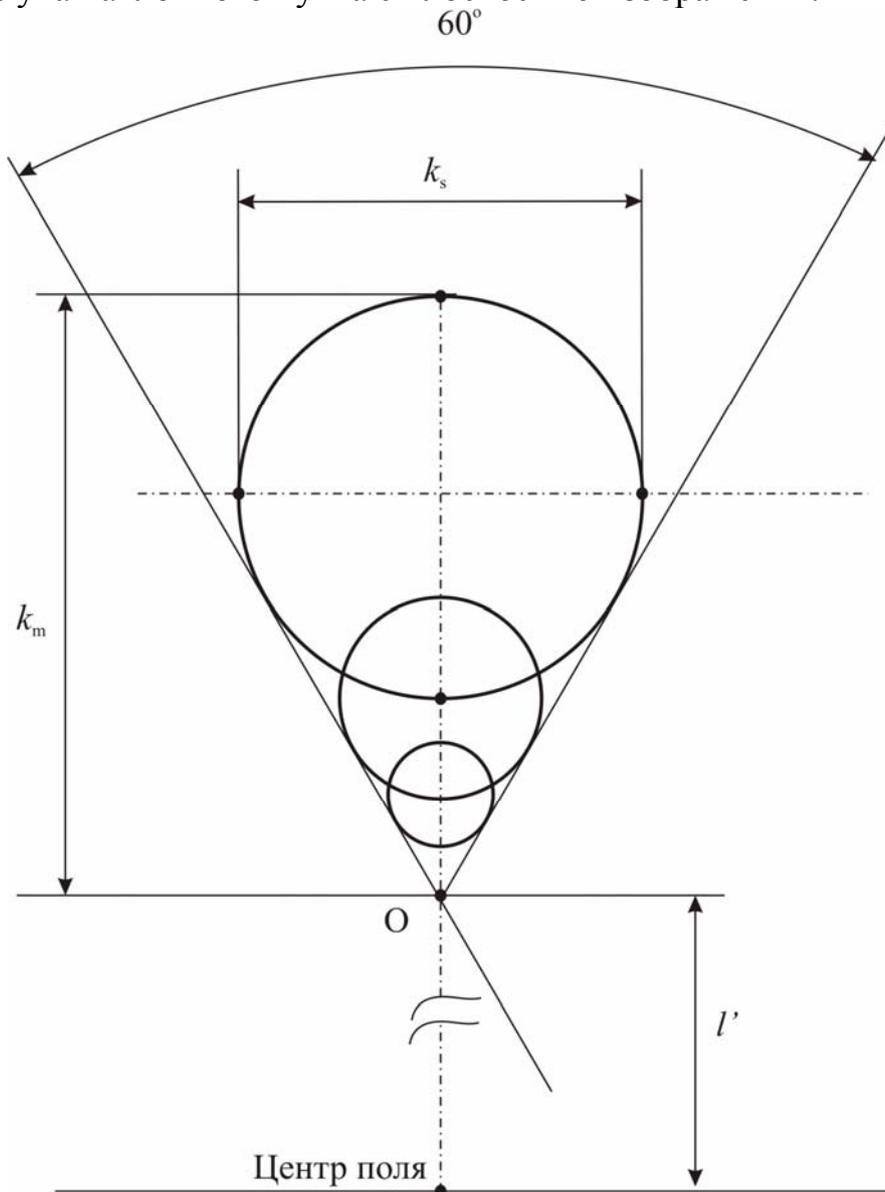


Рис. 1.5 Структура пятна рассеяния при наличии комы третьего порядка

В эпоху ручного расчета хода лучей в оптических системах (по принятой тогда терминологии – тригонометрического расчета) рядом ученых предпринимались попытки получения дополнительной информации об aberrациях на основе выполнения минимального объема вычислений. Так, Аббе сформулировал условие (закон синусов), когда при отсутствии сферической aberrации устраняется кома в области, близкой к оптической оси. Для проверки выполнения этого условия достаточен расчет одного крайнего луча осевого пучка. В дальнейшем Штебле и независимо от него Лихоцкий вывели формулу так называемого отступления от условия изопланатизма (величины  $\eta$ ), с помощью которой можно приблизительно оценить кому вблизи от оптической оси в присутствии сферической aberrации:

$$\eta = \frac{\Delta\beta}{\beta_0} + \frac{\Delta s'}{z'_0 - s'_0}, \quad (1.17)$$

где  $s'_0$  – параксиальное положение изображения,  $z'_0$  – параксиальное положение выходного зрачка;  $\Delta s'$  – продольная сферическая aberrация;  $\beta_0$  – параксиальное линейное увеличение;  $\Delta\beta$  – отступление от условия синусов  $\Delta\beta = \beta - \beta_0$ .

В случае предмета, расположенного на бесконечно большом расстоянии, выражение принимает вид:

$$\eta = \frac{\Delta f'}{f'_0} + \frac{\Delta s'}{z'_0 - s'_0}. \quad (1.18)$$

Величины, входящие в эту формулу, также определяются на основе данных, получаемых путем расчета одного луча осевого пучка.

Величина меридиональной комы связана с величиной  $\eta$  прямопропорционально:

$$k_m = 3l'\eta, \quad (1.19)$$

где  $l'$  – величина изображения,  $\eta$  – величина отступления от условия изопланатизма в относительной мере (не в процентах).

Можно показать, что асферизация поверхности, совмещенной с апертурной диафрагмой, не влияет на отступление от условия изопланатизма, а следовательно, и на кому. Кроме того, кома не зависит от положения зрачка при исправленной сферической aberrации.

### ***Кривизна изображения и астигматизм***

Кривизной поверхности изображения (кривизной поля) называется aberrация, при которой поверхность изображения не является плоской. В большинстве оптических систем эта поверхность близка по форме к параболоиду или сфере. В области первичной aberrации (aberrации третьего порядка) кривизна поля пропорциональна сумме оптических сил отдельных компонентов оптической системы.

При наличии aberrации, называемой астигматизмом, наклонный пучок лучей фокусируется в пространстве изображений в два взаимно-перпендикулярных отрезка прямых линий, расположенных в плоскостях, расстояние между которыми является численной мерой астигматизма. Для выделения астигматизма среди других aberrаций по специальным формулам выполняются расчеты двух бесконечно тонких пучков лучей, осью которых служит главный луч. Один из пучков располагается в меридиональной плоскости, а другой – в сагиттальной. Расстояние от плоскости Гаусса до точки фокусировки меридионального пучка лучей обозначается через  $Z'_m$ , а сагиттального – через  $Z'_s$  (рис.1.6).

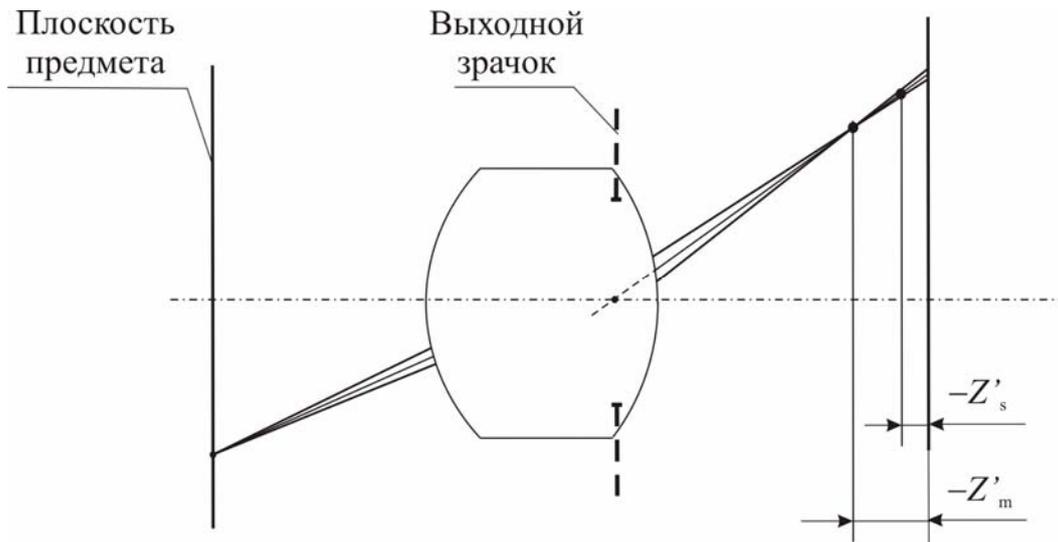


Рис.1.6 Астигматизм и кривизна изображения

Величины  $Z'_m$ ,  $Z'_s$  называются составляющими астигматизма или астигматическими отрезками. Величину астигматизма характеризуют их разностью:

$$ast = Z'_m - Z'_s.$$

Для систем, в которых изображение расположено на бесконечности, астигматизм

$$ast = L'_m - L'_s,$$

где астигматические отрезки  $L'_m$ ,  $L'_s$  выражены в диоптриях.

Соотношение величин  $Z'_m/Z'_s$  в системе, где присутствует только кривизна изображения таково, что при изменении  $\Delta Z'_m$  происходит изменение  $\Delta Z'_s = \Delta Z'_m/3$ . Путем простых преобразований легко получить формулу для величины кривизны изображения (кривизны Петцваля):

$$Z'_p = (3Z'_s - Z'_m)/2. \quad (1.20)$$

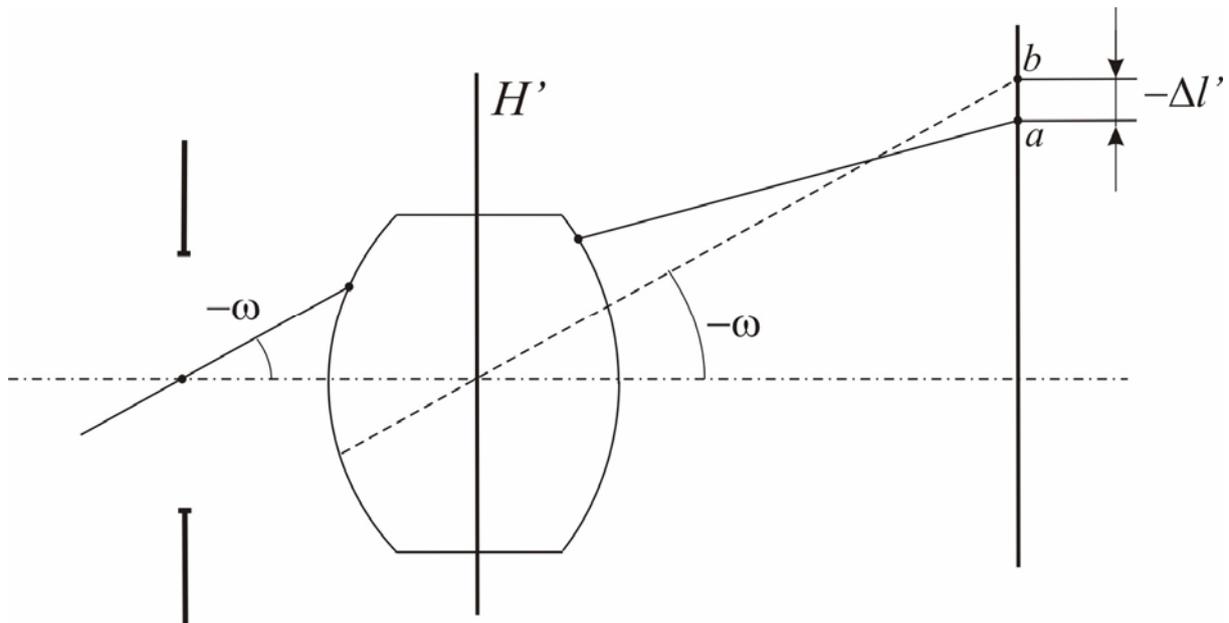
При смещении плоскости установки на величину

$$DS'Y = (Z'_m + Z'_s)/2 \quad (1.21)$$

пятно рассеяния имеет форму круга и минимальные размеры по сравнению с другими положениями плоскости установки в системе, где присутствует только кривизна изображения.

### *Дисторсия*

Несовпадение положения точек изображения с тем, которого для них требует гауссова оптика, называется дисторсией. Эта aberrация ведет к нарушению подобия между предметом и его изображением. Так, в случае рис.1.7 дисторсия прогрессивно уменьшает размеры изображения по мере удаления от центра поля зрения к его краям.



*Рис.1.7 Дисторсия*

В программных комплексах, предназначенных для расчёта оптических систем, дисторсия вычисляется и выдается как поперечная aberrация главного луча, то есть разность ординаты точки пересечения главного луча с плоскостью Гаусса и величины параксиального изображения.

Если предмет расположен на конечном расстоянии, то дисторсия определяется по формуле:

$$\Delta l' = l' - Vl, \quad (1.22)$$

где  $V$  – линейное увеличение,  $l$  – величина предмета.

Если предмет расположен в бесконечности, то

$$\Delta l' = l' + f' \operatorname{tg} \omega, \quad (1.23)$$

где  $f'$  – фокусное расстояние,  $\omega$  – полевой угол в пространстве предметов.

Для телескопических систем дисторсию принято представлять в относительной мере:

$$\Delta = (\Gamma - \Gamma_0) / \Gamma_0, \quad (1.24)$$

где  $\Gamma_0$  – видимое увеличение в параксиальной области,  $\Gamma$  – реальное видимое увеличение, определяемое по формуле:

$$\Gamma = \operatorname{tg}\omega' / \operatorname{tg}\omega, \quad (1.25)$$

где  $\omega'$  – угол главного луча с осью в пространстве изображений.

Для фотографических объективов дисторсию также принято оценивать в относительной мере.

Дисторсия пятна рассеяния не создает. Происходит только искажение формы изображения.

### ***Хроматические aberrации***

Причиной возникновения хроматических aberrаций в оптических системах является зависимость показателей преломления используемых материалов от длины волны света, в результате чего при преломлении монохроматического луча на поверхности системы происходит его расщепление на пучок монохроматических лучей, идущих в различных направлениях.

Визуально хроматические aberrации проявляются в виде цветных ореолов, окружающих отдельные элементы изображения. Если приемник изображения не воспринимает цветовые различия, то хроматические aberrации приводят к нерезкости изображения [7].

Для использования в приборах, работающих в видимой, а также в ближней ИК и УФ областях спектра, предназначено оптическое бесцветное стекло по ГОСТ 3514-94. Большинство стекол, содержащихся в этом стандарте, прозрачно в диапазоне от 0,365 до 2,6 мкм. При расчете оптических систем для видимой области принято использовать в качестве основной длины волны  $\lambda_e = 0,54607$  мкм, а в качестве крайних длин волн диапазона –  $\lambda_{F'} = 0,480$  мкм и  $\lambda_{C'}$  = 0,643 мкм. Коэффициент дисперсии (число Аббе) определяется по формуле:

$$v_e = \frac{n_e - 1}{n_{F'} - n_{C'}}, \quad (1.26)$$

а относительная частная дисперсия:

$$p_{F',e} = \frac{n_{F'} - n_e}{n_{F'} - n_{C'}}. \quad (1.27)$$

Для оптического стекла большей части марок зависимость относительных частных дисперсий от коэффициентов дисперсий близка к линейной. Соответствующую прямую принято называть нормальной. В отечественном каталоге бесцветных оптических стекол в качестве нормальной принята прямая, проходящая через координаты  $p_{F',e}$  и  $v_e$  стекол марок К18 и Ф13. Уравнение нормальной прямой в системе координат  $v_e - p_{F',e}$  имеет вид:

$$p_{F',e} \cdot 10^3 = 542,9 - 0,5702v_e. \quad (1.28)$$

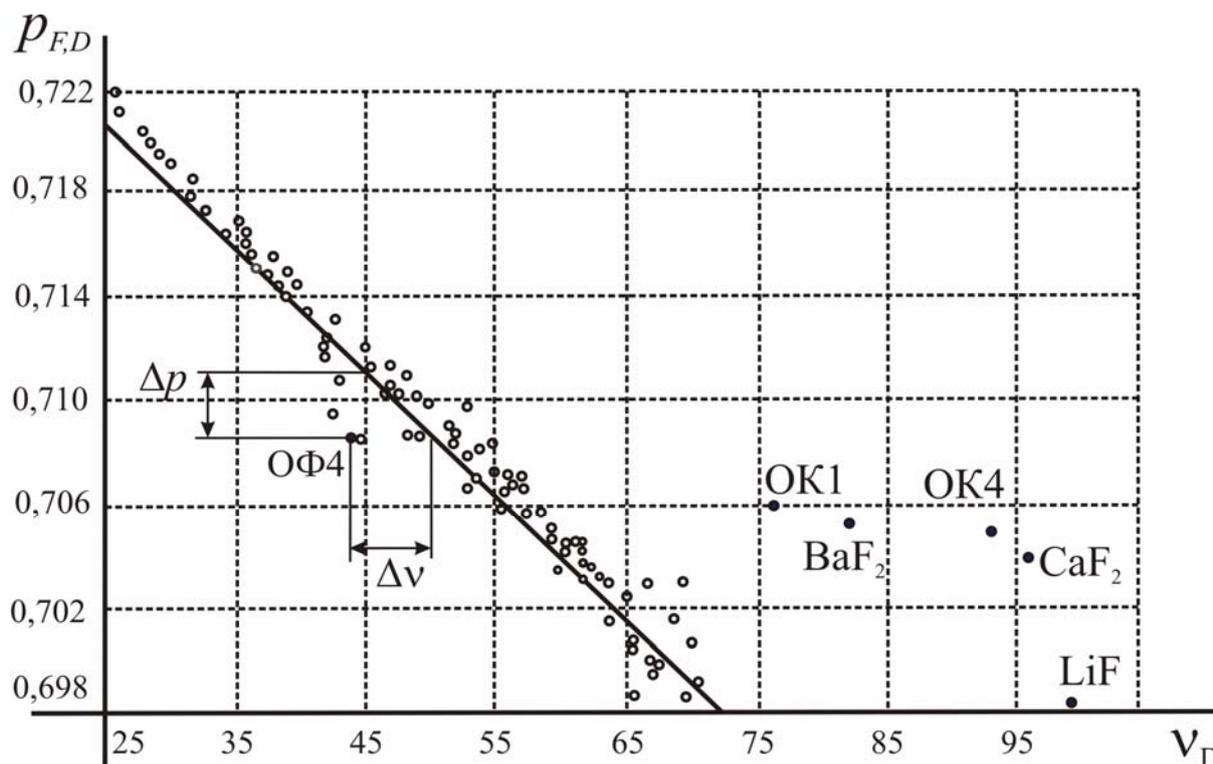


Рис. 1.8 Нормальная прямая стекол в системе координат  $v_D - p_{F,D}$

На рис. 1.8 показана нормальная прямая стекол и отмечено положение некоторых материалов, в том числе стекол особой серии, и флюорита [9].

### Хроматизм положения

Хроматизм положения проявляется в том, что параксиальные изображения (плоскости Гаусса) для дополнительных длин волн света не совпадают между собой и не совпадают с плоскостью Гаусса для основной длины волны. Это приводит при использовании спектрочувствительных приемников к образованию цветной каймы вокруг изображения точки, а в случае применения черно-белых приемников – к размытию изображения точки. Обычно хроматизм положения характеризуют продольной его величиной  $s'_0(2-1) \neq 0$ , которая вызывает хроматизм положения в поперечном измерении  $y'(2-1)$ . При этом при введении плоскости установки

$$DS'Y = [s'_0(1-0) + s'_0(2-0)]/2 \quad (1.29)$$

пятно рассеяния имеет минимальный диаметр при наличии только хроматизма положения.

Для отдельной тонкой линзы в видимой области хроматизм положения, в случае если предмет расположен на бесконечно большом расстоянии  $s = \infty$ :

$$s'_0(2-1) = -f'/v_e, \quad (1.30)$$

а в случае если  $s \neq \infty$ :

$$s'_0(2-1) = -s'^2 / (f'v_e). \quad (1.31)$$

Для коррекции хроматизма положения в паре линз, расположенных вплотную друг к другу, необходимо, чтобы оптические силы определялись следующими выражениями:

$$\varphi_1 = \frac{v_1}{v_1 - v_2}, \quad (1.32)$$

$$\varphi_2 = 1 - \varphi_1 = -\frac{v_2}{v_1 - v_2}. \quad (1.33)$$

В приведенных выше выражениях (1.32) – (1.33) принято, что оптическая сила системы из двух линз  $\varphi = 1$ . Необходимым условием исправления хроматизма положения является  $v_1 \neq v_2$ .

### **Вторичный спектр**

Вторичным спектром называется несовпадение совмещенных плоскостей Гаусса для двух дополнительных длин волн  $\lambda_1, \lambda_2$  с плоскостью Гаусса для основной длины волны  $\lambda_0$ , т.е. величина  $s'_0(2-0)$  при исправленном хроматизме положения  $s'_0(2-1)=0$ .

Вторичный спектр для системы из двух тонких соприкасающихся линз определяется по формуле:

$$s'_0(2-0) = (p_2 - p_1)f'/(v_1 - v_2), \quad (1.34)$$

где  $p$  – относительная частная дисперсия,  $v$  – коэффициент дисперсии.

Как было сказано выше, для подавляющего большинства стекол ГОСТ 3514-94 существует линейная зависимость между относительной частной дисперсией  $p$  и числом Аббе  $v$ . Поэтому при любом количестве линз, выполненных из обычных стекол, вторичный спектр остается неизменным, и в видимом диапазоне для спектральных линий  $e, C', F'$  вторичный спектр определяется выражением:

$$s'_0(2-0) \approx f'/1700. \quad (1.35)$$

На рис. 1.9а показана типичная кривая зависимости  $\Delta s'_\lambda$  от  $\lambda$  для системы с исправленным хроматизмом положения в случае использования обычных марок стекол.

В таблице 1.1 приведены сочетания стекол и соответствующие величины вторичного спектра, а также относительная оптическая сила положительной линзы для каждой пары.

Вторичный спектр для комбинаций из двух стекол получен путем автоматизированной коррекции (требование 11 САРО) хроматизма положения, то есть функции  $b$  для пучка 0 и луча 0, для системы из двух линз с малым воздушным промежутком.

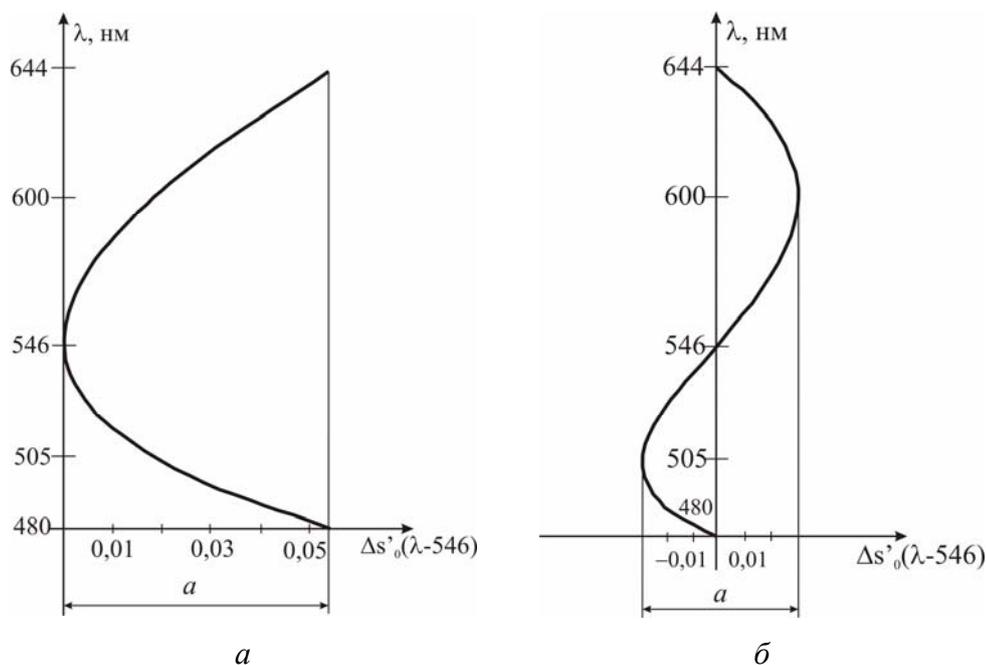


Рис. 1.9 Остаточный хроматизм системы

Комбинация ЛК1 – К8, не содержащая особых стекол, обладает минимальным вторичным спектром, однако оптическая сила кронуевой линзы  $\varphi_k = 14,9$  в подавляющем большинстве оптических систем не приемлема.

Сочетания стекол ТК4 – ОФ4 и ТК21 – ОФ5 использованы в схемах Б.Л.Нефедова [10] для расчета апохроматических систем, свободных также и от сферохроматической аберрации. Комбинации не содержат флюорита и особых кронов.

Для комбинаций из трех стекол вторичный спектр (см. табл. 1.1) получен путем автоматизированной коррекции хроматизма положения (функция 6 программы САРО) и вторичного спектра (функция 7 программы САРО) с использованием требования 11. Функция 7 программы САРО соответствует величине  $s'_0(3 - 2)$ , где в качестве длины волны 3 следует повторить основную. Запись  $s'_0(3 - 2)$  означает разность  $s'_0(3) - s'_0(2)$ , в данном случае  $s'_0(0) - s'_0(2)$ , то есть вторичный спектр с обратным знаком.

Табл. 1.1 Сочетания стекол и соответствующие величины вторичного спектра  $a$  в мм для  $f' = 1000$  мм

№	Комбинации стекол	$\varphi_k$	$a$ , мм
1	K18 – Ф13	2,5	0,56
2	OK1 – КФ7	3,04	0,21
3	OK1 – ОФ4	2,36	0,18
4	OK1 – ОФ6	3,02	0,045
5	OK4 – К8	3,31	0,0086
6	OK4 – ОФ4	1,91	0,17
7	OK4 – ОФ6	2,28	0,078
8	TK4 – ОФ4	4,56	0,23
9	TK21 – ОФ5	5,48	0,12
10	ЛК1 – К8	14,7	0,15
11	CaF <sub>2</sub> – ЛК1	3,63	0,070
12	CaF <sub>2</sub> – SiO <sub>2</sub>	3,5	0,20
13	CaF <sub>2</sub> – OK1	5,05	0,015
14	CaF <sub>2</sub> – ОФ1	2,20	0,072
15	CaF <sub>2</sub> – ОФ4	1,85	0,11
16	CaF <sub>2</sub> – ОФ6	2,18	0,024
17	СТК19 – ТФ4	2,29	0,71
18	СТК19 – ТФ12	2,05	0,76
19	СТК19 – СТФ11	1,49	0,87
20	OK1 – ОФ6–К8	3,70	0,034
21	OK1 – ОФ6–ЛК1	4,20	0,024
22	TK21 – ОФ6 – ФК24	5,10	0,058
23	OK1 – ОФ6 – СТК19	3,20	0,044

Для систем из трех линз, выполненных из различных материалов и не лежащих строго на нормальной прямой, вторичный спектр в принципе может быть исправлен. Однако, как правило, относительные оптические силы линз в этом случае чрезмерно велики. Если в трехлинзовой комбинации хотя бы одно стекло является особым, вторичный спектр может быть строго исправлен, однако зависимость  $\Delta s'_\lambda$  от  $\lambda$  приобретает вид, представленный на рис. 1.9б. При этом мерой вторичного спектра является величина  $a$  на рис. 1.9б. В то же время аналогичный вид кривой имеет место в комбинации флюорит – ОФ6.

Пары стекол OK1 – КФ7 и СТК19 – ТФ4 имеют близкие показатели преломления, поэтому они часто используются как ахроматические, то есть пары с одинаковыми показателями преломления и различными коэффициентами дисперсии. Обратим внимание, что первая пара имеет уменьшенный вторичный спектр, а вторая – увеличенный.

Нет ни одной комбинации, не содержащей особых стекол, в которой был бы исправлен вторичный спектр.

Комбинация флюорит – кварцевое стекло используется в микрообъективах, работающих в области спектра, распространяющейся от УФ до ближнего ИК.

При использовании флюорита, особых кронов (ОК1, ОК4) и легких кронов (ЛК1) следует иметь в виду, что их коэффициенты линейного расширения  $\alpha$  существенно отличаются от таковых у обычных стекол. Так, например, для флюорита  $\alpha = 180 \cdot 10^{-7}$ , для ОК1  $\alpha = 121 \cdot 10^{-7}$ , а для стекла К8  $\alpha = 68 \cdot 10^{-7}$ . Поэтому склейка линз из обычного стекла и флюорита, а также и особых кронов при световых диаметрах более 15 мм недопустима.

*Вторичный спектр систем, состоящих из тонких компонентов, разделенных воздушными промежутками*

Для определения вторичного спектра системы, состоящей из нескольких тонких компонентов, разделенных воздушными промежутками конечной величины, целесообразно воспользоваться формулой для определения хроматизма таких систем [11]:

$$S_I^{xp} = \sum h_i^2 \varphi_i C_i, \quad (1.36)$$

где  $C_i$  – хроматический параметр Слюсарева, для одиночной линзы  $C = -1/v_e$ .

Если вместо этого параметра подставить  $a_i/f'$ , то  $S_I^{xp}$  будет характеризовать вторичный спектр системы, то есть  $S_I^{xp} = a/f'$ . Исследуем зависимость величины  $\psi = \sum h_i^2 \varphi_i$  для системы из двух компонентов от их оптических сил и расстояния между ними.

Сначала рассмотрим систему, в которой  $\varphi_1 > 0$ ,  $\varphi_2 > 0$ . Ограничимся системами, в которых последний отрезок положителен. Целесообразно использовать масштаб, при котором фокусное расстояние  $f' = 1$ . Нетрудно показать, что минимальное значение вторичного спектра имеет место при  $\varphi_1 = 0,5$ ,  $\varphi_2 = 2,5$ ,  $d = 1,6$ ,  $s' = 0,2$  и составляет  $\psi = 0,6$ . При  $\varphi_1 = 0,5$ ,  $\varphi_2 = 2,0$ ,  $d = 1,5$ ,  $s' = 0,25$  величина  $\psi = 0,625$ . Следовательно, в объективе типа Петцваля вторичный спектр несколько уменьшен.

Рассмотрим системы, в которых  $\varphi_1 > 0$ ,  $\varphi_2 < 0$ , то есть систему двухкомпонентного телеобъектива. Например, телеобъектив, у которого длина составляет 0,75 от фокусного расстояния и  $\varphi_1 = -\varphi_2$ , то есть исправлена кривизна изображения, а  $d = 0,23$ ,  $s' = 0,445$ ,  $\psi = 1,4$ .

Для систем, где  $\varphi_1 < 0$ ,  $\varphi_2 > 0$ , например,  $\varphi_1 = -1,75$ ,  $\varphi_2 = 1,75$ ,  $d = 0,5$ ,  $s' = 1,875$  величина  $\psi = 4,4$  (!). Вторичный спектр может быть уменьшен путем использования в первом компоненте стекол с увеличенным вторичным спектром.

В системе Галилея, где  $\varphi_1 > 0$ ,  $\varphi_2 < 0$  при использовании обычных стекол вторичный спектр может быть уменьшен за счет использования во

втором компоненте (окуляре) комбинации стекол с увеличенным вторичным спектром.

### ***Сферохроматическая aberrация***

Зависимость сферической aberrации от длины волны является причиной возникновения сферохроматической aberrации. Продольной сферохроматической aberrацией называется величина:

$$\delta_{\text{хр}} = s'_1(2 - 1) - s'_0(2 - 1) \quad (1.37)$$

Если система обладает большой апертурой, изменения сферической aberrации с изменением длины волны могут становиться весьма значительными и этот недостаток может свести на нет исправление хроматической aberrации [6, 11].

Сферохроматическая aberrация имеет место даже у простейших систем, какими являются объективы зрительных труб, склеенных из двух линз, и, как правило, определяет качество исправления хроматизма в центральной точке поля. Сферохроматическая aberrация третьего порядка постоянна в пределах поля изображения.

Исследования показали, что среди простейших тонких компонентов сферохроматическая aberrация может быть полностью устранена в двухлинзовом компоненте с воздушным промежутком. Действенным параметром в этом случае является воздушный промежуток.

### ***Хроматизм увеличения***

Хроматизм увеличения проявляется в том, что в плоскости Гаусса для основной длины волны изображения внеосевых точек поля для дополнительных длин волн не совпадают как между собой, так и с изображением точки для основной длины волны, а образуют линейный спектр. Эта aberrация существенно снижает частотно-контрастную характеристику внеосевых точек поля изображения.

Хроматизм увеличения (абсолютная величина) в общем случае:

$$\delta l'_j = l'_j(2) - l'_j(1) = (V(2) - V(1)) \cdot l_j \quad (1.38)$$

или

$$\delta l'_j = l_j \cdot dV. \quad (1.39)$$

В относительной мере:

$$\delta l'_j / l'_j(0) = dV / V(0). \quad (1.40)$$

Здесь  $V$  – линейное увеличение для соответствующей длины волны,  $l'$  – величина изображения,  $l$  – величина предмета.

## **2. Методы расчета оптических систем**

### **2.1 Этапы разработки оптической системы**

Разработку системы в виде блок-схемы можно представить как показано на рис. 2.1. Первый этап – это разработка, уточнение и согласование технического задания с заказчиком. На этом же этапе необходимо выполнить проверку реализуемости: не нарушаются ли теоретические пределы требуемого разрешения или требуемой апертуры, соответствует ли числовая апертура и длина волны требуемой разрешающей способности или предельному коэффициенту передачи контраста на заданной частоте, согласованы ли спектральная чувствительность приемника и спектр излучения источника и т.п.

На этапе 2 необходимо осуществить выбор принципиальной оптической схемы, то есть установить типы и взаимное расположение зеркал, призм, компонентов оптической системы. Эта работа неотделима от габаритного расчета, поскольку возможность установки того или иного элемента (например, призмы или зеркала) зависит от соотношения между продольными и поперечными размерами, от расстояний между компонентами и т.п. На этом этапе определяются также фокусные расстояния, относительные отверстия и световые диаметры. Кроме того, устанавливаются поля компонентов оптической системы.

Следует отметить, что на этом этапе разработки средства автоматизации проектирования практически не используются, что обусловлено несколькими причинами:

1. Разработка универсального алгоритма, позволяющего осуществлять габаритный расчет оптических систем различного типа, чрезвычайно сложна и проблематична.
2. Объем вычислений на этом этапе обычно невелик, что позволяет использовать на том этапе стандартные средства для математических расчетов или в некоторых случаях пользоваться графическими методами.
3. Основной объем работы на этом этапе приходится на эвристические операции (принятие решений), которые невозможно автоматизировать.

На следующем этапе осуществляется выбор типа компонентов (числа линз и их взаимного расположения) оптической системы и их абберационный расчет. Этот выбор определяется характеристиками компонентов (угловыми полями, относительными отверстиями и диаметрами, положениями зрачков и т.п.). Кроме того, конструкция компонентов зависит от требований к качеству изображения. Следует отметить, что одинаковыми характеристиками и достаточно малыми абберациями могут обладать различные по конструкции системы, и во многих случаях имеют место различные решения. Эти обстоятельства усложняют выбор оптимальной конструкции.



Рис. 2.1 Этапы разработки оптической системы

На этом этапе может выясниться, что некоторые габаритные соотношения неприемлемы для исправления aberrаций. Так, может оказаться, что относительное отверстие объектива, рассчитанное на этапе 2, приведет к необходимости применения многолинзовой системы с малым задним отрезком, что не позволит разместить предусмотренную принципиальной схемой призму. Поэтому после выполнения части работ, соответствующих этапу 3, может возникнуть необходимость вновь вернуться к этапу 2 и пересмотреть принципиальную оптическую схему прибора. Этот возврат показан стрелкой на рис. 2.1.

Далее выполняется коррекционный расчет отдельных элементов, который осуществляется с помощью вспомогательных критериев качества изображения (например, геометрических или волновых aberrаций) с учетом требований к качеству изображения всей системы в целом (например, определяемому по разрешающей способности или частотно-контрастной характеристике). Связь между допустимыми геометрическими aberrациями и критериями качества изображения можно установить на основе приближенных формул. При коррекционном расчете может обнаружиться, что выбранные ранее принципиальные конструкции отдельных элементов не могут удовлетворить требованиям к качеству изображения. В этом случае необходимо выбрать другую конструкцию и повторить расчет.

На этапе 4 определяются показатели качества изображения – разрешающая способность, частотно-контрастная характеристика, распределение освещенности в изображении точки и т.п. На этом этапе возможно получение несоответствия между вычисленными и заданными показателями качества изображения, что означает, что вспомогательные оценки, использованные на предыдущем этапе, были выбраны неточно или неправильно. В этом случае необходимо уточнить вспомогательные оценки и повторить расчет. На этапе aberrационного расчета необходимо уточнение доступности материала, из которого планируется изготовление системы. Это особенно важно для крупногабаритных систем. На этапе 5 проводится оценка технологичности оптической системы с точки зрения конструкторской реализации. Так, например, в длиннофокусных апохроматах каждая линза закрепляется в своей оправе, а следовательно, должно быть выдержано и определенное минимальное расстояние между линзами на краю полного диаметра. В противном случае неизбежен возврат к этапу 3 с переработкой конструкции.

На этом же этапе производится оценка влияния погрешностей изготовления на aberrации и параксиальные характеристики системы. Путем внесения малых изменений конструктивных параметров оптической системы и расчета хода лучей составляются так называемые таблицы влияния параметров. Производится также вероятностная оценка

суммарного воздействия изменения всех параметров на изменения аберраций.

Если изменения аберраций при предельно жестких допусках имеют недопустимые значения, то влияние параметров анализируют более подробно. Например, если изменение показателя преломления сильно влияет на качество изображения, то может потребоваться перерасчет на плавки, то есть использование при абберационном расчете значений показателей преломления конкретной партии стекла. Следует отметить, что для таких материалов как кварцевое стекло, германий и др. перерасчет на плавки не проводят, поскольку в нормативной документации отклонения для показателей преломления и дисперсий не нормируются, так как эти материалы представляют собой химические вещества, а не сплавы. Если на качество изображения сильно влияет изменение радиусов, то оценивается возможность компенсации аберраций за счет изменения воздушных промежутков. Если для обеспечения требуемого качества изображения значения допустимых децентрировок слишком жесткие, то оценивается возможность их компенсации за счет поперечного смещения других компонентов.

На этапе 6 определяются допуски на изготовление оптических деталей и узлов. Для круглых оптических деталей назначаются допуски на отклонение конструктивных параметров от расчетных значений. Для призм определяются допуски на углы между гранями, требования к плоскостности отражающих и преломляющих поверхностей. Устанавливаются требования к стеклу, из которого выполняются оптические детали, такие как однородность, бессвильность, двойное лучепреломление, пузырность, светопоглощение.

В тех случаях, когда допуски оказываются чрезмерно жесткими, в дальнейшем систему пересчитывают на радиусы пробных стекол, на плавки, на комплектацию линз по толщине, что должно быть указано в технической документации. На этом же этапе анализируют систему на изменение воздушных промежутков в процессе сборки для компенсации влияния погрешностей изготовления. Редки, но возможны случаи, когда на этом этапе выясняется непригодность разработанных на предыдущих этапах элементов из-за недопустимо жестких допусков. Тогда необходим возврат к этапу 3, то есть к замене нетехнологичных элементов, иногда даже более сложными, но менее чувствительными к погрешностям изготовления элементами.

На этапе 6 проводят необходимые по техническому заданию инженерные расчеты: оценивают влияние температуры и давления и оценивают возможность компенсации их влияния; падения освещенности, расчет спектрального пропускания и его однородность по каналам в многоканальных системах и т.д.

После окончания абберационного расчета, когда система удовлетворяет предъявляемым в техническом задании требованиям, в том числе всем дополнительным (термостабильность, падение освещенности по полю и др.) производят переход к радиусам пробных стекол, имеющих на конкретном производстве. Обычно после этого приходится проводить повторную коррекцию системы, исключив из числа коррекционных параметров радиусы кривизны поверхностей. После получения окончательного результата значения толщин и воздушных промежутков округляют.

На следующем этапе происходит оформление технической документации.

Для систем с высокими требованиями к качеству изображения (например, высокоразрешающих фотообъективов) на этапе изготовления и контроля необходимо осуществлять авторский надзор, который заключается в следующем:

- пересчёт оптической системы на плавки стёкол;
- пересчёт на **фактически** измеренные значения пробных стёкол;
- пересчёт на реальные значения толщин линз и общую ошибку поверхности (к сожалению, в условиях современной культуры производства, когда назначенные и принятые допуски могут быть значительно превышены, этот этап может привести к существенному изменению облика системы);
- доводка оптической системы на этапе контроля качества изображения (анализ ошибок сборки и децентрировки и выдача рекомендаций по их исправлению).

Таким образом, проектирование оптической системы можно разделить на несколько этапов:

1. Синтез первоначальной системы
2. Анализ и коррекция системы с использованием средств автоматизированного проектирования оптики
3. Оценка технологичности системы
4. Авторский надзор (сопровождение изготовления и конструирования системы)

На этапе синтеза оптик-проектировщик определяет структуру оптической системы – количество и взаимное расположение линз или зеркал, материалы, из которых они будут выполнены, а также задает численные значения конструктивных параметров для последующей оптимизации [6].

Методы синтеза базируются на теории аббераций, которая позволяет примерно оценить коррекционные возможности оптической системы, то есть возможности исправления тех или иных аббераций с целью получения требуемого качества изображения.

Этап синтеза первоначальной схемы является наиболее сложным этапом при проектировании оптической системы. Успех синтеза зависит в большой степени не только от знания теории аббераций, но и от опыта и интуиции проектировщика. Синтез оптических систем с принципиально новыми свойствами является предметом изобретательства.

## 2.2 Методы расчета оптических систем

Существует несколько возможных методов расчета оптических систем: метод проб (постепенных приближений), метод, основанный на использовании формул теории аббераций третьего порядка (алгебраический) и метод композиции.

### 2.2.1 Метод проб

Наиболее простой путь выбора начальной схемы – *использование баз данных (метод проб [1])*. К базам данных можно отнести:

1. Каталоги оптических систем, имеющиеся, например, в программах автоматизированного проектирования оптики (*Opal, ZEMAX* и др.) или на предприятии, архивные данные
2. Патентные базы данных и литературные источники
3. Собственные наработки проектировщика оптических систем

При синтезе системы методом проб схему из базы данных подбирают с характеристиками, наиболее близкими к желаемым. Например, в качестве начальной схемы выбирают объектив с относительным отверстием и угловым полем в пространстве предметов большим либо равным желаемой величине и фокусным расстоянием, примерно равным требуемому. Этот метод дает наиболее быстрый результат и широко используется при расчете систем, однако он не всегда оптимален, так как в некоторых случаях может привести к избыточному количеству оптических элементов. Выбранную оптическую систему принимают за исходную и выполняют абберационный анализ с помощью специализированных программ, оценивают качество изображения. В случае, если оно не удовлетворяет техническому заданию, выполняют автоматизированную коррекцию до получения оптической системы с требуемым качеством изображения. Для выбора коррекционных параметров проводят анализ изменения аббераций при изменении конструктивных параметров. Если выбранная из каталога и пересчитанная на выбранные характеристики оптическая система после оптимизации не позволяет получить желаемого результата, то выбирают другую или усложняют исходную.

Этот метод дает хорошие результаты, когда требуемые характеристики системы незначительно отличаются от характеристик системы из каталога.

Расчет оптических систем методом проб достаточно трудоемок, длителен и не способствует созданию новых, патентночистых оптических систем [1].

### 2. 2. 2. Синтез из тонких компонентов (алгебраический метод)

*Синтез* оптических систем, состоящих из тонких компонентов, был разработан профессором Г.Г. Слюсаревым [11] в первой половине XX века. Метод, основанный на теории аббераций третьего порядка, позволяет находить предварительные значения конструктивных параметров оптических систем, состоящих из групп линз, соприкасающихся вершинами или разделенными конечными воздушными промежутками. Особенно эффективно метод используется для расчетов объективов и оборачивающих систем зрительных труб, компонентов сложных микроскопов, расположенных между объективом и окуляром, систем для формирования лазерного излучения. Важнейшими условиями его применения является отсутствие в составе оптической системы линз с толщинами, соизмеримыми с их фокусными расстояниями, и небольшие угловые поля и числовые апертуры. Однако некоторые важные выводы теории тонких компонентов позволяют на стадии синтеза выбрать перспективные конструктивные решения, не прибегая к расчету предварительных значений конструктивных параметров.

#### ***Абберационные свойства тонкого компонента***

##### ***1. Предмет на бесконечности***

Основным выводом теории Г.Г.Слюсарева является то, что все монохроматические абберации третьего порядка тонкого компонента – сферическая, кома, астигматизм, кривизна поля, дисторсия – независимо от количества оптических поверхностей, входящих в этот компонент, определяются тремя свободными основными параметрами  $P^*$ ,  $W^*$  и  $\pi$ . В случае, когда предмет находится на бесконечности, а входной зрачок совпадает с компонентом, параметры  $P^*$ ,  $W^*$  связаны с абберациями третьего порядка следующими выражениями:

$$\Delta s' = -\frac{m^2 P^*}{2f'}, \quad (2.1)$$

$$\eta = \frac{1}{2} \left( \frac{m}{f'} \right)^2 W^* \quad (2.2)$$

где  $m$  – высота луча на входном зрачке компонента,  $f'$  – фокусное расстояние,  $\Delta s'$  – продольная сферическая абберация третьего порядка,  $\eta$  – отступление от условия изопланатизма, определяющее кому третьего порядка. Параметры  $P^*$  и  $W^*$  в свою очередь связаны с конструктивными параметрами компонента:

$$P^* = \sum_{i=1}^{i=k} h_i \left( \Delta \alpha_i / \Delta \frac{1}{n_i} \right)^2 \Delta \frac{\alpha_i}{n_i} \quad (2.3)$$

$$W^* = \sum_{i=1}^{i=k} h_i \left( \Delta \alpha_i / \Delta \frac{1}{n_i} \right) \Delta \frac{\alpha_i}{n_i} \quad (2.4)$$

Символ здесь  $\Delta$  обозначает разность:  $\Delta \alpha_i = \alpha_{i+1} - \alpha_i$ . В формулах (2.3) – (2.4) применяется нормировка  $h_1 = f' = 1$ ,  $\alpha'_p = 1$ ,  $k$  – число поверхностей компонента.

Параметр  $\pi$  связан с кривизной изображения – стрелкой Петцваля  $Z'_p$  следующим образом:

$$Z'_p = -\frac{l'^2}{2f'} \pi, \quad (2.5)$$

где  $l'$  – величина изображения.

Параметры  $P^*$ ,  $W^*$  связаны с конструктивными параметрами компонента алгебраическими формулами, вид которых зависит только от числа линз, входящих в компонент. Параметр  $\pi$  зависит только от относительных оптических сил компонента  $\phi_i$  и показателей преломления  $n_i$ :

$$\pi = \sum_{i=1}^{i=p} \phi_i / n_i, \quad (2.6)$$

где  $\phi_i = f'/f'_i$ ,  $f'$  – фокусное расстояние компонента,  $f'_i$  – фокусные расстояния отдельных линз, входящих в состав компонента,  $p$  – количество линз в компоненте. Параметр  $\pi$  вычисляется при нормировке  $f' = 1$ .

В оптических системах, работающих в видимой области спектра, показатели преломления стекол, как правило, находятся в диапазоне от 1,45 до 1,95. Опыт расчета таких систем показывает, что параметр  $\pi$  в этом случае с достаточной точностью можно считать постоянным и равным 0,7, тогда кривизна изображения тонкого компонента:

$$Z'_p \approx -0,35 \frac{l'^2}{f'} \quad (2.7)$$

Если входной зрачок совпадает с тонким компонентом, то составляющие астигматизма  $Z'_m$  и  $Z'_s$  не зависят от основных параметров  $P^*$ ,  $W^*$  и вычисляются:

$$Z'_m = -\frac{l'^2}{2f'} (3 + \pi) \approx -1,85 \frac{l'^2}{f'} \quad (2.8)$$

$$Z'_s = -\frac{l'^2}{2f'} (1 + \pi) \approx -0,85 \frac{l'^2}{f'} \quad (2.9)$$

Кривизна изображения тонкого компонента (2.7) существенно меньше составляющих астигматизма и зависит только от основного параметра  $\pi$ . В инфракрасной области спектра, когда в качестве материалов линз

применяют высокопреломляющие германий, селенид цинка и кремний, основной параметр  $\pi$  составляет 0,25 – 0,41.

Если одну или несколько поверхностей тонкого компонента подвергнуть деформации, то есть асферизовать, то происходит только изменение параметра  $P^*$ , а параметры  $W^*$  и  $\pi$  остаются неизменными.

Когда входной зрачок не совпадает с компонентом, а находится на расстоянии  $a_p$  от него, связь между сферической aberrацией и основным параметром  $P^*$  остается прежней, а отступление от условия изопланазии выражается следующим образом:

$$\eta = \frac{1}{2} \left( \frac{m}{f'} \right)^2 (W^* + P^* \cdot t), \quad (2.10)$$

где  $t = a_p / f'$

Составляющие астигматизма при этом равны:

$$Z'_m = -\frac{l'^2}{2f'} (3S_{III} + \pi), \quad (2.11)$$

$$Z'_s = -\frac{l'^2}{2f'} (S_{III} + \pi), \quad (2.12)$$

где в свою очередь

$$S_{III} = 1 + t^2 P^* + 2t W^* \quad (2.13)$$

Первичные хроматические aberrации – хроматизм положения и хроматизм увеличения, являющиеся aberrациями параксиальных лучей и поэтому формально не относящиеся к третьим порядкам, – по Г.Г. Слюсареву характеризуются основным параметром  $C^*$ , который при нормировке  $\alpha_1 = 0$ ,  $h_1 = f'$  вычисляется следующим образом:

$$C^* = \sum_{i=1}^{i=p} \frac{\Delta \alpha_i}{\Delta \frac{1}{n_i}} \Delta \frac{\delta n_i}{n_i}, \quad (2.14)$$

где  $\delta n_i$  – дисперсия оптических материалов, равная

$$\delta n_i = n(2) - n(1),$$

где  $n(2)$ ,  $n(1)$  – показатели преломления для крайних длин волн рассматриваемого диапазона.

Для визуальных приборов длина волны (2) –  $F'$  (0,480 мкм), (1) –  $C'$  (0,643 мкм), основная длина волны  $e$  (0,546 мкм), то есть  $n_i = n_e$ ,  $\delta n_i = n_{F'} - n_{C'}$ .

Хроматизм положения определяется при  $s = \infty$  следующим образом:

$$s'_0(2 - 1) = C^* f'. \quad (2.15)$$

Если предмет расположен на конечном расстоянии (при  $s \neq \infty$ ):

$$s'_0(2 - 1) = C^* s'^2 / f'. \quad (2.16)$$

Хроматизм увеличения при любом расположении предмета равен:

$$\delta l' = t \cdot l' C^*. \quad (2.17)$$

Из теории Слюсарева вытекает важный вывод: если в многокомпонентной системе у всех компонентов  $C^* = 0$ , то хроматизм положения и увеличения устранены. При этом компоненты могут находиться на любых расстояниях друг от друга. Такая ахроматизация называется стабильной.

## 2. Предмет на конечном расстоянии

Все аберрации третьего порядка тонкого компонента, если предмет расположен на конечном расстоянии, по-прежнему определяются тремя основными параметрами  $P^*$ ,  $W^*$  и  $\pi$ . Продольная сферическая аберрация вычисляется по формуле:

$$\Delta s' = -\frac{V \cdot s_1 \cdot \sigma'^2}{2} P, \quad (2.18)$$

где  $V$  – линейное увеличение,  $s_1$  – расстояние от компонента до предмета,  $\sigma'$  – апертурный угол в пространстве изображений (в радианах), а параметр  $P = S_1$  связан с основным параметром  $P^*$  следующей зависимостью:

$$P = (1 - V)^3 P^* + 4V(1 - V)^2 W^* + V(1 - V)[2V(2 + \pi) - 1] \quad (2.19)$$

Отступление от условия изопланатизма  $\eta$  находится по формуле:

$$\eta = \frac{1}{2} \sigma'^2 (W + tP), \quad (2.20)$$

$$W = (1 - V)^2 W^* + V(1 - V)(2 + \pi), \quad (2.21)$$

$$t = a_p / V(a_p - s_1) \quad (2.22)$$

Если входной зрачок совпадает с тонким компонентом (при  $a_p = 0$ , и, как следствие,  $t = 0$ ), составляющие астигматизма не зависят ни от основных параметров  $P$ ,  $W$ , ни от положения предмета и определяются формулами (2.8) и (2.9).

## 3. Синтез систем, состоящих из нескольких тонких компонентов

Монохроматические аберрации третьего порядка системы, состоящей из нескольких тонких компонентов, разделенных конечными воздушными промежутками, зависят от основных параметров  $P^*$ ,  $W^*$  и  $\pi$ , а также от внешних параметров, определяющих положения предметов и зрачков для каждого из компонентов. В формулах Г.Г.Слюсарева в качестве внешних параметров используются высоты пересечения лучей с совмещенными главными плоскостями компонентов двух параксиальных лучей (рис. 2.2):

1. первого, выходящего из осевой точки предмета под углом  $\alpha_1 = V$ , где  $V$  – линейное увеличение всей системы, и имеющего на главных плоскостях высоты  $h_i$
2. второго, выходящего из центра входного зрачка под углом  $\beta_1 = 1$  и имеющего на главных плоскостях высоты  $u_i$ .

В качестве внутренних параметров используются параметры  $P$  и  $W$  компонентов, связанные с основными параметрами формулами (2.19), (2.21), где в качестве линейного увеличения берут увеличение компонента.

Целесообразно использовать принцип, при котором для каждого отдельного компонента  $P_i = W_i = 0$ . На основании формул (2.19), (2.20) получаем:

$$P_i^* = \frac{V_i}{(1-V_i)^2} [4V_i + 1 + 2\pi V_i], \quad (2.23)$$

$$W_i^* = \frac{V_i}{V_i - 1} (2 + \pi). \quad (2.24)$$

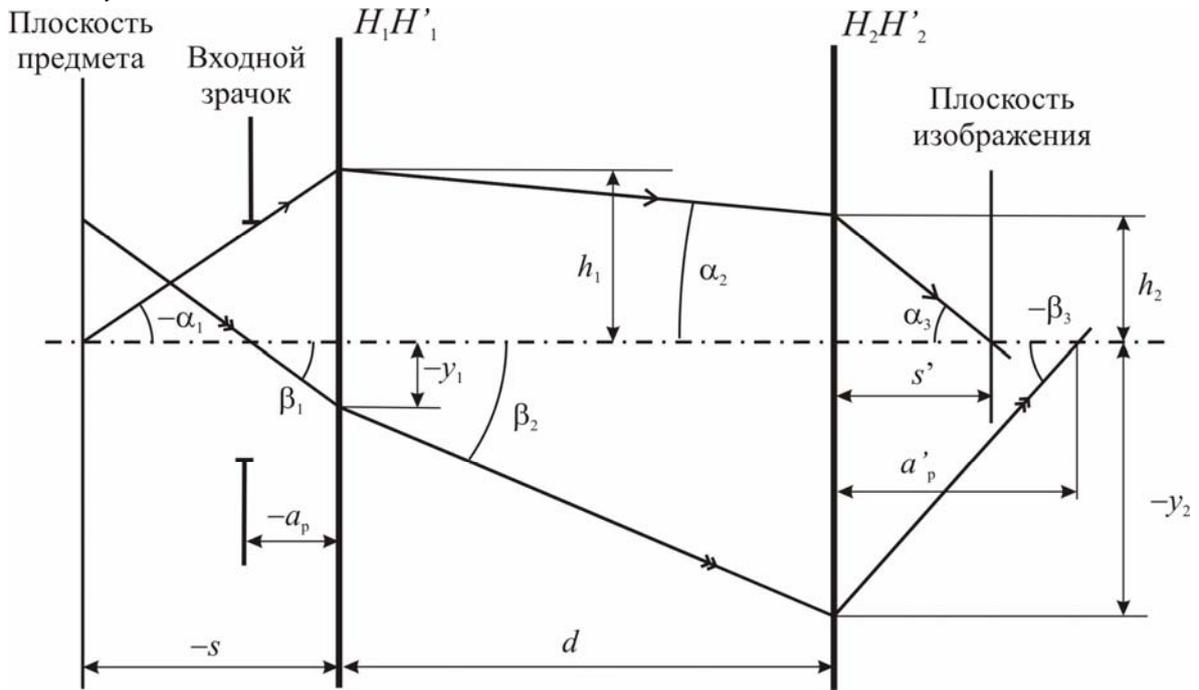


Рис. 2.2 Ход первого и второго параксиального лучей

Коэффициенты aberrаций третьего порядка:  $S_I$  – определяющий сферическую aberrацию,  $S_{II}$  – определяющий кому,  $S_{III}$  – определяющий астигматизм,  $S_{IV}$  – определяющий кривизну изображения,  $S_V$  – определяющий дисторсию, связаны с внутренними параметрами компонентов  $P$ ,  $W$  и основным параметром  $\pi$ , а также с внешними параметрами  $h_i$  и  $y_i$  следующим образом:

$$S_I = \sum h_i P_i, \quad (2.25)$$

$$S_{II} = \sum y_i P_i - V(a_p - s_1) \sum W_i, \quad (2.26)$$

$$S_{III} = \sum y_i^2 P_i / h_i - 2V(a_p - s_1) \sum y_i W_i / h_i + V^2(a_p - s_1)^2 \sum \varphi_i \quad (2.27)$$

$$S_{IV} = \sum \varphi_i \pi_i \quad (2.28)$$

$$S_V = \sum y_i^3 P_i / h_i^2 - 3V(a_p - s_1) \sum y_i^2 W_i / h_i + V^2(a_p - s_1)^2 \sum y_i \varphi_i (3 + \pi) / h_i \quad (2.29)$$

Использование приведенных довольно громоздких формул (2.25) – (2.29) в практической работе при синтезе оптических систем нерационально, так как требует большой вычислительной работы. Однако анализ этих выражений позволяет сделать важный практический вывод. Если исправить каждый компонент системы на сферическую aberrацию и кому, то есть принять параметры компонентов  $P_i = W_i = 0$ , тогда на основании приведенных формул (2.25) – (2.26) в оптической системе будут скорректированы сферическая aberrация и кома третьего порядка. Если при этом выполнить условие  $\sum \varphi_i = 0$ , то из формулы (2.28) следует  $S_{IV} \approx 0$ . Следовательно, кривизна изображения будет невелика.

На основании формулы (2.27) также можно утверждать, что и астигматизм третьего порядка будет также устранен. Таким образом, при выполнении вышеперечисленных условий оптическая система, состоящая из нескольких тонких компонентов, разделенных конечными воздушными промежутками, обладает только дисторсией, величина которой, как правило, незначительна благодаря малым полям, с которыми работают системы рассматриваемого типа. Устранение сферической aberrации и комы, кроме удобства расчета, позволяет получить оптическую систему, устойчивую к погрешностям изготовления и сборки.

Если предмет расположен в бесконечности, то использование формул (2.26), (2.27) и (2.29) невозможно, так как возникают неопределенности, связанные с произведениями величин  $s_1 = \infty$  и  $V = 0$ . В этом случае при расчете первого и второго параксиального лучей целесообразно использовать нормировку, при которой фокусное расстояние системы принимается за единицу измерения  $f' = 1$ , а высота первого параксиального луча на первой поверхности системы  $h_1 = f' = 1$ . Тогда по-прежнему:

$$S_I = \sum h_i P_i, \quad (2.30)$$

$$S_{II} = \sum y_i P_i + \sum W_i, \quad (2.31)$$

$$S_{III} = \sum y_i^2 P_i / h_i + 2 \sum y_i W_i / h_i + \sum \varphi_i \quad (2.32)$$

$$S_{IV} = \sum \varphi_i \pi_i \quad (2.33)$$

Аберрации третьего порядка связаны с коэффициентами aberrаций следующими зависимостями:

$$\Delta s' = -\frac{m^2 S_I}{2f'} \quad (2.34)$$

$$\eta = \frac{m^2 S_{II}}{2f'} \quad (2.35)$$

$$Z'_m = -\frac{l^2}{2f'} (3S_{III} + S_{IV}) \quad (2.36)$$

$$Z'_s = -\frac{l'^2}{2f'}(S_{III} + S_{IV}) \quad (2.37)$$

$$Z'_p = -\frac{l'^2}{2f'}S_{IV}, \quad (2.38)$$

где  $m$  – высота, на которой осевой луч пересекает входной зрачок,  $f'$  – фокусное расстояние системы,  $l'$  – величина изображения.

Очень часто метод расчета на основе aberrаций третьего порядка применяют к отдельным частям схемы. Для этого в процессе синтеза разбивают оптическую систему на части, каждую из которых рассчитывают отдельно. Важно, чтобы части оптической системы можно было представить как самостоятельные элементы, к которым могут быть предъявлены определенные требования. Таким образом, например, проектируют отдельно две половины линзовой оборачивающей системы, симметричные относительно апертурной диафрагмы (рис.2.3).

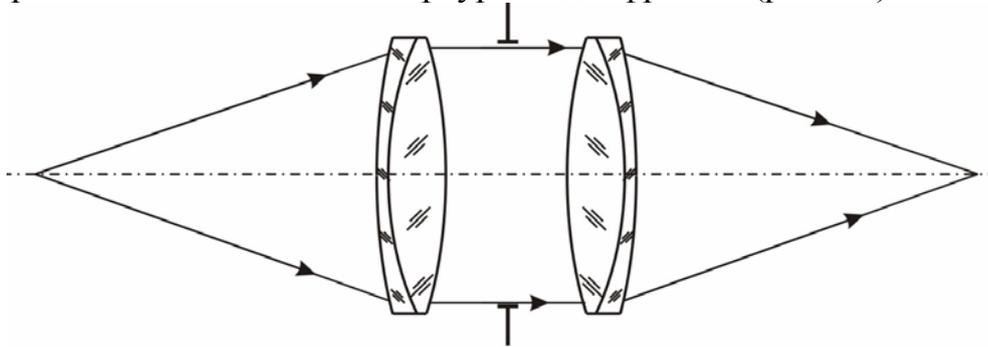


Рис. 2.3 Симметричная линзовая оборачивающая система

Следует отметить также, что в современных сложных оптических системах может оказаться, что aberrации высших порядков настолько велики, что исправление aberrаций третьего порядка не дает удовлетворительного качества изображения. Также следует упомянуть, что теорию aberrаций третьего порядка применяют только для центрированных систем или схем, которые можно свести к таковым.

### 2.2.3 Синтез оптических систем из поверхностей с особыми свойствами (метод композиции)

Профессором М.М.Русиновым был разработан метод, нашедший широкое применение в практике расчетов оптических систем [2, 6, 12], основанный на использовании поверхностей, у которых частично или полностью устранены некоторые aberrации. Метод получил название композиции оптических систем. Суть метода сводится к постепенному усложнению оптической схемы путем постепенного добавления к уже образованной части системы дополнительных поверхностей. Метод особенно эффективен для разработки оптических систем с большими

угловыми полями и не очень высокими требованиями к качеству изображения. Если в методе Г.Г.Слюсарева основными элементами, из которых синтезируется оптическая система, являются тонкие компоненты, содержащие как правило, более чем одну линзу, то в методе М.М.Русинова основным элементом является отдельная, преимущественно преломляющая поверхность. В этом случае толщина линз не ограничивается условиями применения метода.

Таким образом, в методе композиции оптическая система komponуется из элементов с заранее известными свойствами. К таким элементам могут относиться апланатические и концентрические поверхности, конфокальные поверхности, плоскопараллельные пластины, а также линзы с известными свойствами. Для всех этих элементов абберационные свойства, а также их силовые характеристики при необходимости могут быть получены в виде относительно простых зависимостей.

Некоторые характеристики поверхностей, свободных от сферической абберации и комы, представлены в табл. 2.1. В таблице 2.1  $s$ ,  $s'$  – расстояние от поверхности до предмета и изображения соответственно,  $\alpha$ ,  $\alpha'$  – углы первого параксиального луча с осью до и после поверхности,  $n$ ,  $n'$  – показатели преломления материала до и после поверхности,  $V$  – линейное увеличение.

Использование таких поверхностей позволяет при их сочетании получать линзы (мениски), также апланатические. В свою очередь добавление подобных апланатических менисков в оптическую систему позволяет изменить некоторые характеристики системы, при этом не оказывая влияния на достигнутую коррекцию сферической абберации и комы.

Табл. 2.1 Апланатические поверхности

№		$s$	$s'$	$\alpha'$	$V$
1	Апланатическая	$r \frac{n+n'}{n}$	$r \frac{n+n'}{n'}$	$\alpha \frac{n'}{n}$	$\left(\frac{n}{n'}\right)^2$
2	Конфокальная	$r$	$r$	$\alpha$	$\frac{n}{n'}$
3	Близфокальная	$\approx 0$	$\approx 0$	$\alpha \frac{n}{n'}$	1

При синтезе апланатических поверхностей значительно удобнее пользоваться записью конструктивных параметров не через радиусы оптических поверхностей, а через углы первого параксиального луча с осью [2, 6].

Апланатическая поверхность первого рода (A1), для которой выполняется условие

$$\alpha' \cdot n' - \alpha \cdot n = 0, \quad (2.39)$$

обладает нулевыми значениями коэффициентов aberrаций третьего порядка  $S_I$ ,  $S_{II}$  и  $S_{III}$ . В формуле (2.65)  $\alpha'$  и  $\alpha$  – углы первого параксиального луча с осью после поверхности и до нее;  $n'$  и  $n$  – показатели преломления сред после поверхности и до нее.

Для апланатической поверхности второго рода А2 (конфокальной), когда  $\alpha' = \alpha$ , суммы Зейделя  $S_I = S_{II} = 0$ . Кроме того, эта поверхность может рассматриваться как частный случай концентрической системы, в которой плоскость предмета проходит через центр поверхностей, поэтому у апланатической поверхности второго рода сагиттальная составляющая поперечной aberrации равна нулю при любой апертуре. Сагиттальная составляющая астигматизма  $Z'_s = 0$  и  $S_{III} = -S_{IV}$ . Следовательно, для апланатической поверхности второго рода

$$S_{III} = \frac{1/n' - 1/n}{r}. \quad (2.40)$$

Наличие астигматизма у поверхности может сыграть положительную роль, так как возможны ситуации, когда наличие определенного астигматизма полезно. Такое положение имеет место, например, в системах с неустранимой кривизной изображения.

Кроме апланатической, конфокальной и близфокальной поверхностей, при синтезе систем широкое применение нашли поверхности, концентричные входному зрачку. В этом случае центр поверхности совпадает с центром зрачка, и главные лучи, выходящие из центра зрачка, совпадают с нормальными к поверхности. Каждый главный луч может быть принят за вспомогательную оптическую ось, являющуюся осью симметрии внеосевого пучка как меридиональных, так и сагиттальных лучей. После преломления симметрия пучков относительно главного луча сохраняется, благодаря этому отсутствует кома и астигматизм, положение предмета при этом роли не играет. Поэтому такую поверхность иногда называют изопланатической. В общем случае сферическая aberrация такой поверхности не устранена, однако, поместив плоскость предмета на расстояние

$$s = r(n + n')/n, \quad (2.41)$$

определяющее положение предмета, при котором изображение будет иметь апланатическую коррекцию aberrаций, можно устранить и сферическую aberrацию.

Линейное увеличение поверхности, концентричной зрачку, не определено. Поэтому задать такую поверхность углами первого параксиального луча с осью невозможно. Добавление такой поверхности к сформированной части системы осуществляется на основе данных, полученных в результате расчета хода лучей, а именно, положения выходного зрачка. Поверхность, концентричная зрачку, находит

самостоятельное применение в виде сферического зеркала в широкоугольных коллиматорах.

Далее приведены некоторые примеры линз, образованных из рассмотренных выше поверхностей с особыми абберационными свойствами.

На рис. 2.4а представлена линза с конфокальной первой и апланатической второй поверхностями. Устранены сферическая абберация и выполнено условие изопланатизма. Астигматизм не зависит от положения зрачка. Астигматическая разность  $(Z'_m - Z'_s) < 0$ . Линейное увеличение линзы  $V = n$ , где  $n$  – показатель преломления материала, из которого выполнена линза. Линзы такого типа используются главным образом во фронтальной части объективов микроскопов и в конденсорах.

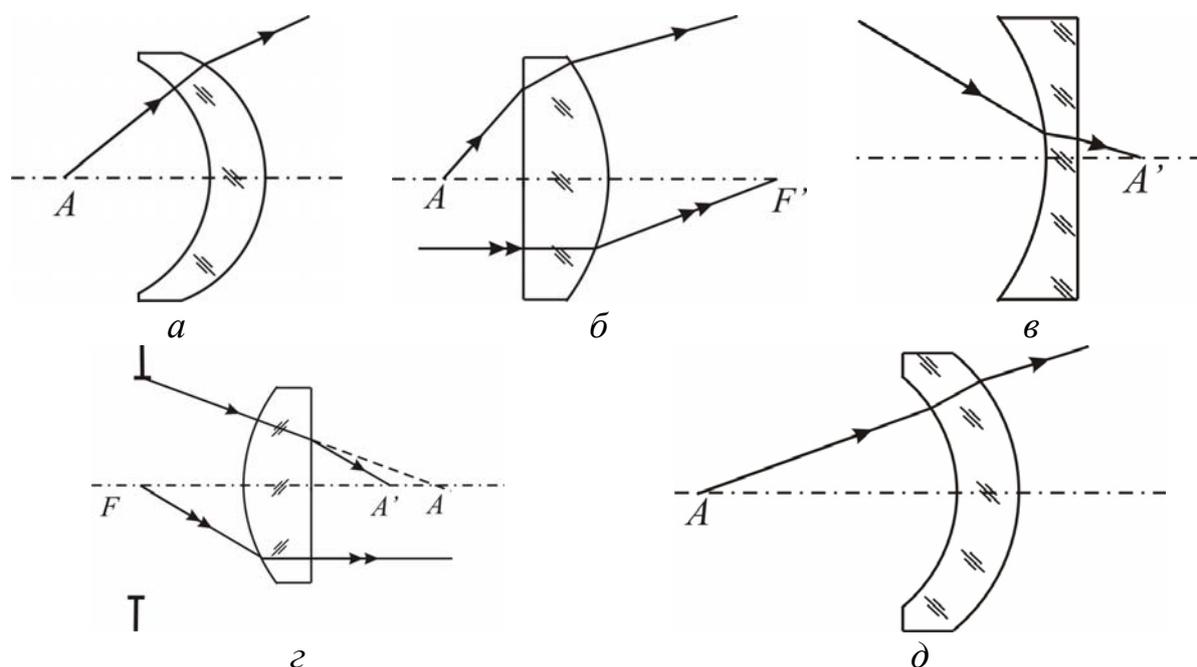


Рис. 2.4 Линзы, образованные поверхностями с особыми свойствами

На рис.2.4б показана линза, образованная плоской и апланатической поверхностями. Входной зрачок расположен на бесконечности, что соответствует условиям работы фронтальной линзы объектива микроскопа. Устранен астигматизм и выполнено условие изопланатизма. Первая поверхность вносит отрицательную сферическую абберацию, если предмет расположен в воздухе. Для иммерсионных микрообъективов обычно показатель преломления стекла линзы выбирают равным показателю преломления иммерсии, которая заполняет пространство предметов. В этом случае первая поверхность становится безабберационной в монохроматическом свете, а линза – строго апланатичной и анастигматичной в области аббераций третьего порядка.

Линзы такого типа используются почти исключительно в качестве фронтальных компонентов объективов микроскопа. Линейное увеличение такой линзы  $V$  не зависит от наличия иммерсии и равно  $V = n^2$ .

На рис. 2.4в изображена так называемая линза Смита, предназначенная для коррекции кривизны изображения фотографических объективов с малыми задними отрезками. Обе поверхности являются близфокальными. Линза обладает небольшой сферической аберрацией и комой, вызванной сдвигом поверхностей линзы относительно поверхности изображения. Астигматизм пятого порядка может достигать заметных значений особенно тогда, когда радиус кривизны поверхности линзы соизмерим с величиной изображения.

На рис. 2.4г изображена линза, образованная первой поверхностью, концентричной точке осевой предмета, и плоской поверхностью, концентричной выходному зрачку. Линза обладает астигматизмом, обратным по знаку астигматизму тонкого компонента, что позволяет использовать ее для создания анастигматических систем. У этой линзы соблюдается условие изопланатизма, то есть отсутствие комы в области аберраций третьего порядка. Сферическая аберрация может быть устранена, если вторая поверхность будет близфокальной. На базе использования таких линз строятся объективы микроскопа с малыми и средними значениями числовых апертур, а также фотографические объективы – анастигматы типа Петцваля.

На рис. 2.4д изображена линза, образованная двумя апланатическими поверхностями и предназначенная для компенсации кривизны изображения в системах с небольшими полями изображения, такими, как объективы микроскопов с небольшими числовыми апертурами и некоторыми типами фотографических объективов. Такая линза не вносит сферическую аберрацию, у нее соблюдено условие изопланатизма и устранен астигматизм третьего порядка. Однако при числовых апертурах, превышающих 0,3, заметно проявлении комы и астигматизма пятых порядков.

Если оптическая система состоит из апланатических, конфокальных и изопланатических поверхностей, то соотношение между меридиональной  $Z'_m$  и сагиттальной  $Z'_s$  составляющими астигматизма третьего порядка может быть представлено в виде

$$\frac{Z'_m}{Z'_s} = \frac{3S_{III} + S_{IV}}{S_{III} + S_{IV}} = \frac{3 \sum_{i=1}^{i=k} \frac{1/n'_i - 1/n_i}{r_i} - \sum_{j=1}^{j=p} \frac{1/n'_j - 1/n_j}{r_j}}{\sum_{i=1}^{i=k} \frac{1/n'_i - 1/n_i}{r_i} - \sum_{j=1}^{j=p} \frac{1/n'_j - 1/n_j}{r_j}}, \quad (2.42)$$

где  $k$  – количество апланатических поверхностей второго рода (конфокальных);  $p$  – общее количество поверхностей в системе.

Расширение возможностей синтезируемых оптических систем может быть достигнуто путем сочетания линз с апланатическими и изопланатическими поверхностями и бесконечно тонких компонентов (например, двойного склеенного компонента, одиночной линзы и

склеенного компонента и т. п.) [13, 14]. Известно, что в этих бесконечно тонких компонентах легко осуществляется хорошее исправление сферической аберрации и комы. Компенсация астигматизма тонкого компонента может быть достигнута путем введения конфокальных поверхностей, а исправление кривизны изображения – с помощью апланатических и изопланатических поверхностей.

Поскольку апланатические поверхности не обладают сферической аберрацией и комой, то и компоненты (обозначим их К) в таких системах должны быть исправлены в отношении рассмотренных аберраций. В этом случае, как известно, астигматизм третьего порядка не зависит от положения входного зрачка. На этом основании при построении системы положение зрачка может быть произвольным, а при окончательном расчете зрачок следует расположить заданным образом.

Для бесконечно тонкого компонента, у которого  $S_I = S_{II} = 0$ , коэффициенты аберраций третьего порядка  $S_{III}$  и  $S_{IV}$  равны:

$$S_{III} = \frac{1}{f'_k}, \quad (2.43)$$

$$S_{IV} = \frac{0,7}{f'_k}, \quad (2.44)$$

где  $f'_k$  – фокусное расстояние компонента.

Суммарное значение коэффициента аберрации третьего порядка  $S_{III}$  для системы, состоящей из произвольного количества апланатических поверхностей А1, из  $t$  компонентов К и из  $k$  конфокальных поверхностей А2, составляет

$$S_{III} = \sum_{l=1}^{l=t} \frac{1}{f'_l} + \sum_{i=1}^{i=k} \frac{1/n'_i - 1/n_i}{r_i}. \quad (2.45)$$

Суммарное значение коэффициента Петцваля  $S_{IV}$  примерно равно

$$S_{IV} = 0,7 \sum_{l=1}^{l=t} \frac{1}{f'_l} + \sum_{i=1}^{i=p} \frac{1/n'_i - 1/n_i}{r_i}, \quad (2.46)$$

где  $p$  – суммарное количество апланатических и конфокальных поверхностей А1 и А2.

Сопоставление формул (2.45) и (2.46) показывает, что для исправления астигматизма компонента К необходимо ввести по крайней мере одну поверхность типа А2, обладающую кривизной изображения того же знака, что и компонент К, частичная или полная компенсация кривизны изображения достигается введением поверхностей типа А1.

Если оптическая система помимо апланатических поверхностей А1 и А2 содержит также изопланатические поверхности (И), то тогда для исправления сферической аберрации бесконечно тонкий компонент, входящий в эту систему, должен обладать  $S_I \neq 0$  и  $S_{II} = 0$ . При этом величины  $S_{II}$  и  $S_{III}$  становятся зависимыми от положения зрачка

относительного компонента К, причем это положение в процессе расчета иногда неизвестно. В этом случае при синтезе системы рекомендуется использовать следующий прием. В начале расчета полагаем, что зрачок совпадает с компонентом К, тогда независимо от  $S_I$  коэффициенты aberrаций третьего порядка этого компонента:

$$S_{II} = 0, \quad (2.47)$$

$$S_{III} = \frac{1}{f'_k}. \quad (2.48)$$

Следовательно, кома и астигматизм компонента К определены. Остальная часть системы, состоящая из апланатических, конфокальных и изопланатических поверхностей, рассчитывается таким образом, чтобы исправить требуемым образом астигматизм и кривизну изображения. С этой целью используются формулы (2.45) и (2.46), причем в последней формуле под величиной  $p$  следует понимать суммарное количество поверхностей А1, А2 и И. При введении изопланатических поверхностей И следует иметь в виду, что апертурная диафрагма располагается на компоненте К.

После выполнения синтеза системы входной (выходной) зрачок системы следует расположить заданным образом. Обратим внимание на то, что если для системы в целом  $S_I = S_{II} = S_{III} = S_{IV} = 0$ , то при переходе от расчетного положения зрачка к заданному значения всех коэффициентов монохроматических aberrаций третьего порядка остаются неизменными, то есть указанное равенство сохраняется, а коэффициент  $S_V$  имеет то же значение, которое он имел при расчетном положении входного зрачка. Полученная система используется в качестве исходной при проведении дальнейшей автоматизированной коррекции.

Рассмотренные приемы синтеза оптических систем, содержащих тонкие компоненты и апланатические и изопланатические поверхности, применимы в основном тогда, когда угловое поле зрения сравнительно невелико.

Следует отметить, что при синтезе оптических систем из поверхностей с особыми aberrационными свойствами по методу М.М.Русинова хроматические aberrации игнорируются. Предполагается, что в дальнейшем они будут устранены с помощью введения хроматических радиусов, то есть отдельная линза разбивается на две, выполненные из разных марок стекол с близкими показателями преломления, но различными дисперсиями (например, ТК16 – Ф1 и др.) Это обстоятельство предопределяет ограниченный выбор марок стекол.

Кроме отдельных поверхностей, при синтезе оптических систем М.М.Русинов применял так называемые базовые компоненты. На рис.2.5 показаны некоторые из них:

1. Плоско-выпуклая линза, обращенная плоской стороной к бесконечно удаленному предмету, у которой центр второй поверхности совмещен с центром входного зрачка. Первая поверхность такой линзы не вносит ни астигматизма, ни комы, ни сферической aberrации, вторая поверхность обладает сферической aberrацией, постоянной по полю (рис. 2.5а)
2. Толстая линза, центры кривизны обеих поверхностей совмещены друг с другом и с центром входного зрачка. Такая концентричная линза свободна от астигматизма и комы, а также от дисторсии (рис.2.5б).
3. Толстая линза, первая поверхность концентрична входному зрачку, вторая, плоская поверхность совмещена с поверхностью изображения. Такая линза свободна от астигматизма, комы и дисторсии (рис.2.5в) .
4. Толстая линза, у которой первая поверхность концентрична входному зрачку, вторая поверхность имеет тот же радиус, что и первая, и совмещена с поверхностью изображения. Такая линза свободна от астигматизма, комы, дисторсии и кривизны изображения (рис. 2.5г).
5. Тонкая линза, у которой первая поверхность концентрична входному зрачку, а вторая поверхность является апланатической. Линза свободна от астигматизма и комы (рис. 2.5д)

Конкретные значения конструктивных параметров линз такого типа можно найти в [12].

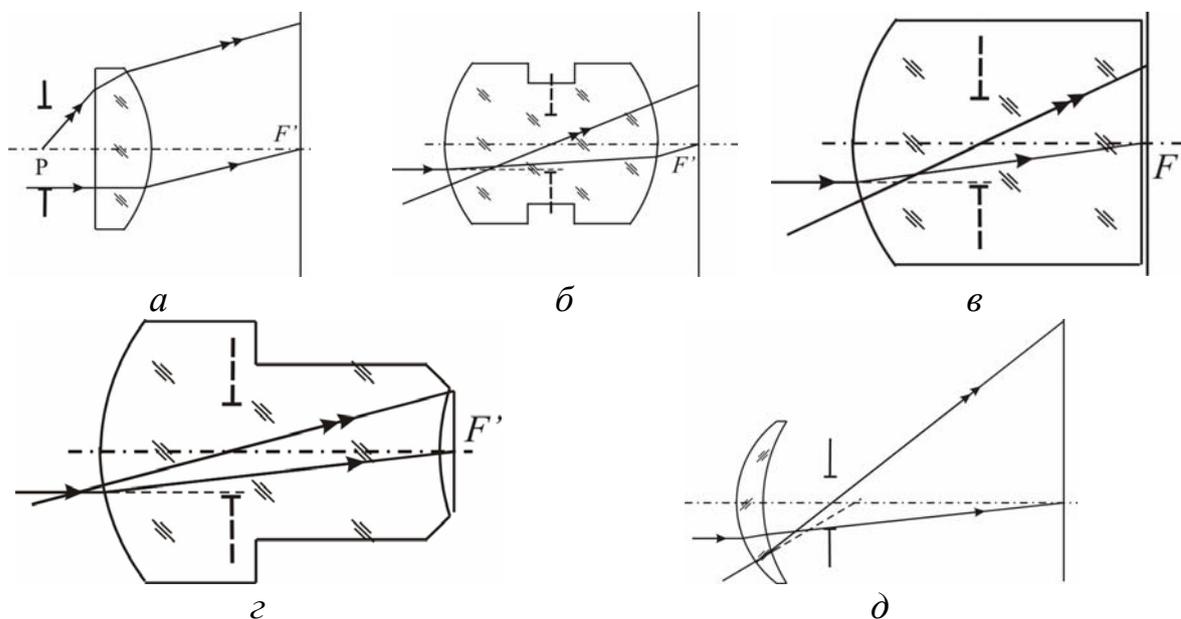


Рис. 2.5 Базовые линзы М.М.Русинова

Предложенный М. М. Русиновым метод синтеза оптических систем, состоящих из анастигматических апланатических поверхностей и поверхностей, расположенных по нормали к главному лучу

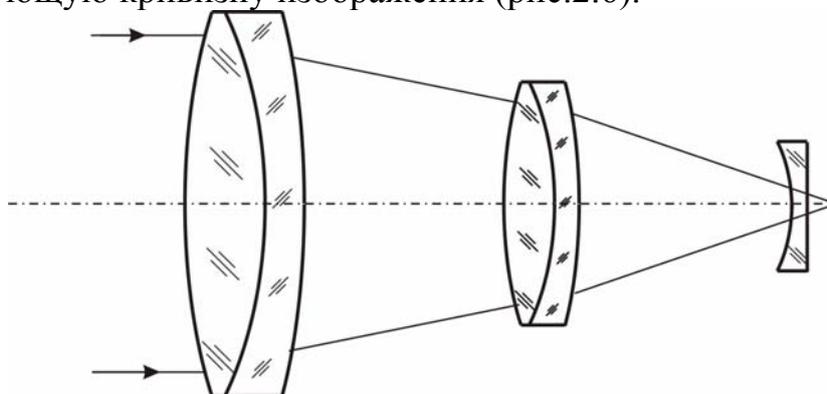
(изопланатических поверхностей), с успехом используется при разработке фотографических объективов и других систем, в которых волновые aberrации существенно превышают критерий Рэлея.

Это вызвано рядом трудностей, связанных с исправлением сферической aberrации. Действительно, в общем случае изопланатическая поверхность вносит определенную сферическую aberrацию, для компенсации которой необходимо ввести еще, по крайней мере, одну такую же поверхность, обладающую сферической aberrацией обратного знака. Как правило, эта компенсация только частичная в связи с возникновением неустраняемой сферической aberrации пятого и более высоких порядков.

### ***Сочетание методов Г.Г.Слюсарева и М.М.Русинова***

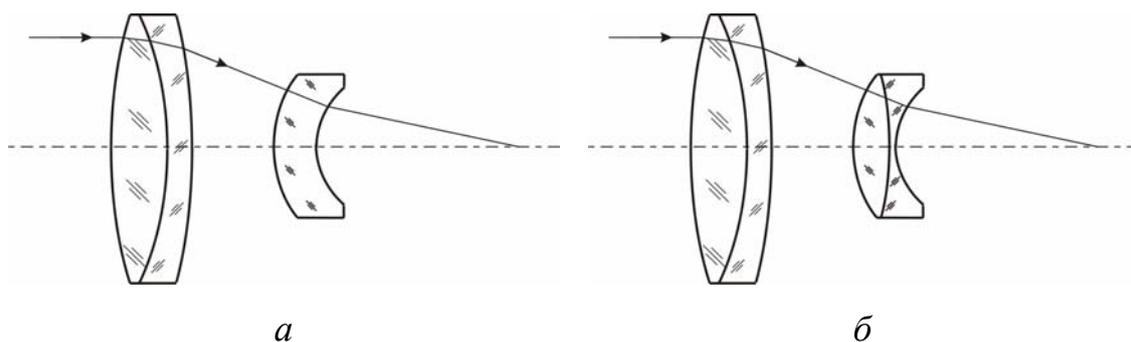
Методы, основанные на методе проб, методе Г.Г.Слюсарева и М.М.Русинова, на практике часто сочетают: к системам, заимствованным из каталога или рассчитанным согласно теории aberrаций третьего порядка, добавляют элемент с известными свойствами для того, чтобы система удовлетворяла требованиям технического задания.

Например, к объективу, в котором не исправлена положительная кривизна изображения, добавляют отрицательную линзу, компенсирующую кривизну изображения (рис.2.6).



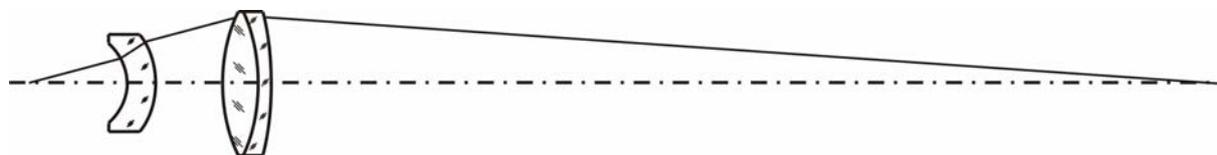
*Рис. 2.6 Объектив Петцваля с линзой Смита*

Пример сочетания двух методов – М.М.Русинова и Г.Г.Слюсарева – объектив, построенный из склеенного компонента, рассчитанного согласно методу Слюсарева на основе формул теории aberrаций третьего порядка, и мениска, образованного сочетанием конфокальной и апланатической поверхностей (рис. 2.7а). Для устранения хроматических aberrаций в такой схеме в мениск необходимо вводить хроматический радиус (рис. 2.7б ) [7].



*Рис.2.7 Объектив с апланатическим мениском*

Объектив микроскопа небольшого увеличения можно рассчитать в виде совокупности апланатической линзы и склеенного компонента, работающего с конечным увеличением (рис.2.8).



*Рис.2.8 Объектив микроскопа небольшого увеличения*

Таким образом, процесс синтеза представляет собой достаточно сложный, эвристический этап проектирования оптических систем, требующий глубокого знания теории aberrаций оптических систем. Выбор схемы на этом этапе, предназначенной для дальнейшей коррекции, зачастую определяет успешность результата – окончательной схемы.

### 3. Методы автоматизированной коррекции оптических систем

Как уже говорилось выше, процесс проектирования оптической системы начинается с выбора исходной системы. Этап синтеза является очень важным, поскольку удачный выбор исходной системы часто позволяет сократить время поиска решения.

Желательно, чтобы исходная оптическая система была по возможности достаточно близка по своим характеристикам к заданной системе, описываемой в техническом задании, однако некоторые требования могут не выполняться.

Для того чтобы система удовлетворяла предъявляемым к ней требованиям, можно изменять некоторые параметры системы, следя за тем, как изменяется требуемая характеристика. Например, изменяя прогиб линзы, можно найти такое его значение, при котором размер кружка рассеяния минимален. В простейших случаях такой подбор можно выполнить вручную, однако уже при большем числе параметров такой подбор выполняется с помощью специализированных программ и встроенных функций автоматизированной коррекции (оптимизации). На этапе «доводки» (авторского надзора) оптической системы возможны случаи, когда приходится, несмотря на всю сложность исправления требуемых характеристик и критериев, корригировать систему в «ручном» режиме, пользуясь сводкой влияния параметров.

Под автоматизированной коррекцией понимается нахождение с помощью САПР (программных комплексов) численных значений параметров некоторой выбранной разработчиком конструкции оптической системы, при которых характеристики оптической системы (поле зрения, относительное отверстие, фокусное расстояние, увеличение и т.п.) имеют заданные значения, а aberrации (или коэффициенты aberrаций) либо минимальны, либо также имеют заданное значение.

Принципиально для проведения автоматизированной коррекции необходимо:

1. Задать исходную оптическую систему
2. Указать параметры оптической системы, которые могут изменяться в процессе коррекции (коррекционные параметры); если это необходимо, указать пределы, в которых они могут изменяться (то есть задать ограничения)
3. Указать требуемые значения характеристик и aberrаций оптической системы

Конструктивные параметры исходной оптической системы могут быть получены из каталогов, архивов или патентов, путем предварительного расчета в области aberrаций третьего порядка (в том числе с помощью средств автоматизации, например, требования 7 программы SAPO), найдены с помощью метода композиции

М.М.Русинова, образованы путем усложнения какой-либо известной конструкции или найдены путем сочетания перечисленных методов.

В качестве коррекционных параметров могут быть приняты любые конструктивные параметры заданной исходной оптической системы, в том числе – радиусы кривизны поверхностей, толщины линз, воздушные промежутки, коэффициенты уравнений асферических поверхностей, показатели преломления материалов, расстояния до предмета и зрачка и т.п. В качестве корригируемых функций (характеристик) могут быть как абберационные характеристики (поперечные, волновые, продольные абберации и т.п.), так и масштабные-силовые (увеличение, фокусное расстояние, длина системы и др.).

Все программы автоматизированной коррекции построены таким образом, что к исходной оптической системе предъявляется обязательное требование: лучи, с помощью расчета которых определяются корригируемые абберации, не должны испытывать полное внутреннее отражение и должны иметь точки встречи со всеми поверхностями оптической системы. В противном случае некоторые корригируемые функции (абберации)  $\Phi_j$  в исходной системе не будут определены. Случаи возникновения засечек на поверхностях или превышение заданного светового диаметра не препятствуют достижению успешного результата коррекции.

Необходимо также, чтобы такие корригируемые функции, как увеличение  $V$  или фокусное расстояние  $f'$  в исходной оптической системе имели бы знак, совпадающий со знаком соответствующей заданной величины. Действительно, если фокусное расстояние в исходной оптической системе отрицательное, а требуется получить положительное фокусное расстояние, то в процессе коррекции фокусное расстояние должно пройти либо через ноль, либо через бесконечность. Но при уменьшении фокусного расстояния по абсолютному значению при постоянном диаметре зрачка начинают резко возрастать абберации. При возрастании фокусного расстояния по абсолютному значению абберации в линейной мере также возрастают и становятся бесконечно большими в афокальной системе. Следовательно, перемена знака фокусного расстояния или увеличения в процессе непрерывных изменений, осуществляемых при автоматизированной коррекции, невозможна.

### 3.1 Постановка задачи

Пусть имеется некоторая оптическая система с известными конструктивными параметрами (исходная система). В общем случае значения ее параксиальных характеристик (задний отрезок  $s'_0$ , фокусное расстояние  $f'_0$ , положение зрачка относительно последней поверхности  $z'_p$  и др.) и абберации системы не равны заданным. Задачей автоматизированной коррекции является нахождение таких значений

конструктивных параметров, при которых параксиальные характеристики и aberrации имели бы заданные значения, то есть были бы скорректированы.

Пусть корректируемые функции – функции, которые подлежат коррекции, –  $\Phi_j$  ( $j=1,2 \dots k$ ); конструктивные параметры системы, которые целесообразно изменять в процессе коррекции, – коррекционные параметры  $p_i$  ( $i = 1,2 \dots t$ ). Обозначим заданные значения корректируемых функций –  $\Phi_j$ , допустимые отклонения от заданных значений –  $\delta\Phi_j$ , значения коррекционных параметров в исходной системе через  $p_{i,0}$ , соответствующее значение корректируемых функций – через  $\Phi_{j,0}$ . Задача автоматизированной коррекции ставится как нахождение  $p_i$ , при которых корректируемые функции будут иметь значения, лежащие внутри интервала  $\Phi_j \pm \delta\Phi_j$ . Аналитические зависимости между коррекционными параметрами и aberrациями представить в явном виде не удастся, однако по известным значениям конструктивных параметров оптической системы нетрудно найти ее aberrации и параксиальные характеристики, для чего достаточно выполнить расчет хода лучей.

Для решения поставленной задачи в зависимости от соотношения между количеством коррекционных параметров  $t$  и корректируемых функций  $k$  применяются различные методы [15].

### 3.2 Метод Ньютона

Известный математический метод, используемый для нахождения корней нелинейных уравнений или систем нелинейных уравнений, может быть применен только в случае  $k=t$ .

Приращения функций  $\Phi_j$  можно представить в виде разложения в ряд Тейлора по степеням приращения коррекционных параметров. Ограничиваясь в каждом ряду первым членом разложения, то есть полагая, что между приращениями параметров и приращениями функций существует линейные зависимости, можно записать:

$$\begin{aligned}\Phi_1 - \Phi_{1,0} &= \sum_{i=1}^{i=t} \frac{\partial \Phi_1}{\partial p_i} \Delta p_i \\ \Phi_2 - \Phi_{2,0} &= \sum_{i=1}^{i=t} \frac{\partial \Phi_2}{\partial p_i} \Delta p_i \\ &\dots \\ \Phi_k - \Phi_{k,0} &= \sum_{i=1}^{i=t} \frac{\partial \Phi_k}{\partial p_i} \Delta p_i,\end{aligned}\tag{3.1}$$

где  $\Phi_1, \Phi_2 \dots \Phi_k$  – текущие значения функций, а приращения параметров  $\Delta p_i = p_i - p_{i,0}$ .

Подставив в систему уравнений (3.1) вместо текущих функций заданные значения, то есть положив  $\Phi_1 = \bar{\Phi}_1$ ,  $\Phi_2 = \bar{\Phi}_2$ , ...  $\Phi_k = \bar{\Phi}_k$ , получим систему  $k$  линейных уравнений с  $k$  неизвестными (3.2).

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{i=t} \frac{\partial \Phi_1}{\partial p_i} \Delta p_i &= \bar{\Phi}_1 - \Phi_{1,0} \\ \sum_{i=1}^{i=t} \frac{\partial \Phi_2}{\partial p_i} \Delta p_i &= \bar{\Phi}_2 - \Phi_{2,0} \\ &\dots \\ \sum_{i=1}^{i=t} \frac{\partial \Phi_k}{\partial p_i} \Delta p_i &= \bar{\Phi}_k - \Phi_{k,0}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Решив эту систему, найдем значения изменений коррекционных параметров  $\Delta p_1, \Delta p_2, \dots, \Delta p_t$ . Внесем эти изменения в исходную оптическую систему и рассчитаем значения функций  $\Phi_j$ , то есть выполним расчет хода лучей. Если значения всех функций окажутся внутри заданных интервалов, то решение задачи окончено. В противном случае система, полученная после приближения, принимается за исходную для следующего приближения, и процесс повторяется вновь.

Частные производные  $\frac{\partial \Phi_j}{\partial p_i}$ , необходимые для составления системы линейных уравнений (3.2), можно определить принципиально двумя разными способами. Один из них основан на применении точных формул для производных  $\frac{\partial \Phi_j}{\partial p_i}$ , получаемых путем установления

дифференциальных соотношений между конструктивными параметрами оптической системы и параметрами, определяющими положение лучей.

В основу другого, более распространенного способа положен метод численного дифференцирования. Каждый из коррекционных параметров системы поочередно изменяется на некоторую малую величину  $\delta p_i$ , а затем по точным формулам путем расчета хода луча производится вычисление новых функций, соответствующих новой системе. С некоторой степенью точности можно принять, что частные производные  $\frac{\partial \Phi_j}{\partial p_i}$  равны частным

от деления приращений функций на приращения соответствующих параметров:

$$\frac{\partial \Phi_j}{\partial p_i} = \frac{\Phi_j^+ - \Phi_j^-}{2\delta p_i},$$

где  $\Phi_j^+$  – значение функции, соответствующей значению параметра  $p_i + \delta p_i$ , а  $\Phi_j^-$  – значение функции, соответствующей значению параметра  $p_i - \delta p_i$ .

Второй способ определения частных производных имеет явные преимущества благодаря универсальности – независимости применяемого алгоритма и формул от функций и параметров, хотя и дает меньшую точность. Использование первого способа сопряжено с выводом большого количества громоздких формул и их программированием.

Метод Ньютона в рассмотренном классическом виде не нашел применения в программах для автоматизированной коррекции из-за плохой сходимости. Действительно, при разложении функций  $\Phi_j$  в ряд были опущены члены, содержащие производные выше первого порядка. Поэтому область применимости системы линейных уравнений ограничивается малыми изменениями параметров. Однако при решении системы линейных уравнений изменения параметров могут получиться сколь угодно большими, и их введение в исходную систему приведет к абсурдным результатам, например, непрохождению лучей или к расхождению итерационного процесса, при котором новые значения аберраций будут отличаться от заданных больше, чем в исходной системе. Во избежание этих явлений применяется модифицированный метод Ньютона.

### 3.3 Модифицированный метод Ньютона

Суть модификации сводится к тому, что полученное решение системы линейных уравнений используется лишь для определения направления в пространстве параметров, в котором необходимо осуществить итерационный шаг. Величина шага в этом направлении, то есть длина вектора приращений коррекционных параметров  $\overline{\Delta p}$  определяется из условия получения минимума вспомогательной оценочной функции вида

$$F = \sum_{j=1}^{j=k} \left( \frac{\Phi_j - \overline{\Phi}_j}{\delta \Phi_j} \right)^2. \quad (3.3)$$

Для пояснения сказанного обратимся к геометрической интерпретации рассматриваемой задачи. Имеются два многомерных ( $k$ -мерных) пространства: параметров (рис. 3.1а) и функций (рис. 3.1б) и представлено решение задачи, в которой количество коррекционных параметров и корригируемых функций равно двум. Масштаб в пространстве параметров может быть выбран произвольно, а в пространстве функций масштаб (метрику пространства) выберем так, чтобы по обеим осям единице измерения соответствовали допуски на заданные значения функций  $\delta \Phi_1$  и  $\delta \Phi_2$ .

Исходной оптической системе в пространстве параметров соответствует точка  $P_0$ , а в пространстве функций  $\Phi_0$ . Задача сводится к нахождению в пространстве параметров хотя бы одной точки, которой в пространстве функций соответствовала бы точка, лежащая внутри многомерного куба (в рассматриваемом двумерном случае – квадрата) со сторонами, равными  $2\delta\Phi_1$  и  $2\delta\Phi_2$ , и центром симметрии в точке  $\bar{\Phi}$ .

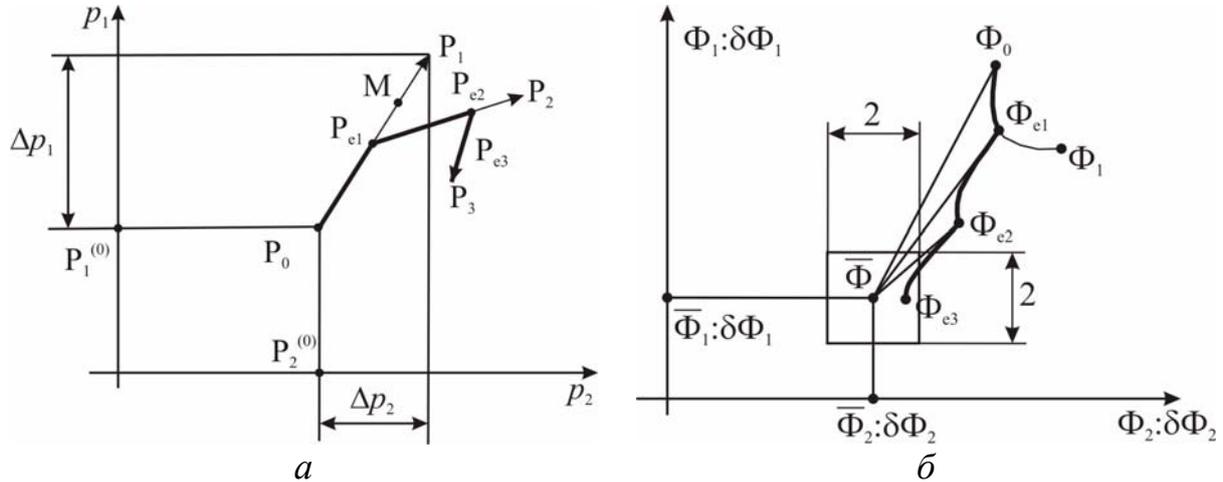


Рис. 3.1 Геометрическая иллюстрация процесса коррекции

Пусть в результате решения системы линейных уравнений (3.2) найдены значения приращений параметров  $\Delta p_1$  и  $\Delta p_2$ . Этим приращением в пространстве параметров соответствует многомерный вектор  $\overrightarrow{P_0P_1}$  (в рассматриваемом примере – двумерный). Если бы между приращениями параметров и приращениями функций существовала бы линейная связь, то перемещению из точки  $P_0$  в точку  $P_1$  пространства параметров вдоль вектора  $\overrightarrow{P_0P_1}$  соответствовало бы перемещение по прямой в пространстве функций из точки  $\Phi_0$  в точку  $\bar{\Phi}$ . В действительности, из-за нелинейности зависимости перемещению из точки  $P_0$  в точку  $P_1$  пространства параметров будет соответствовать некоторая криволинейная траектория, например  $\Phi_0, \Phi_{e1}, \Phi_1$ . На этой траектории точка  $\Phi_{e1}$  расположена на минимальном расстоянии от точки  $\bar{\Phi}$ . Очевидно, что этому расстоянию соответствует минимум вспомогательной функции (3.3). Если ввести параметр  $\psi$ , характеризующий положение некоторой точки  $M$  на векторе  $\overrightarrow{P_0P_1}$ , причем  $\psi = P_0M/P_0P_1$ , то можно рассматривать расстояние в пространстве между точкой  $\bar{\Phi}$  и любой точкой, лежащей на кривой  $\Phi_0\Phi_{e1}\Phi_1$ , как функцию одной переменной  $\psi$ . Точка  $\Phi_{e1}$  соответствует  $\partial F/\partial\psi = 0$ . Осуществляя несколько пробных шагов по прямой  $P_0P_1$  в пространстве параметров и вычисляя соответствующие значения функции  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , нетрудно путем интерполяции найти точку  $P_{e1}$ , соответствующую точке  $\Phi_{e1}$  в пространстве функций. После этого следует повторить весь процесс вычислений, приняв точку  $P_{e1}$  за исходную для следующего

итерационного шага. На рис.3.1б утолщенными линиями показаны траектории движения в пространстве функций за три итерационных шага.

После выполнения каждого итерационного шага необходимо сравнить значения функций  $\Phi_j$  с заданными значениями  $\bar{\Phi}_j \pm \Phi_j$ . Если все корригируемые функции находятся внутри заданных интервалов, то расчет заканчивается. В противном случае осуществляется следующий шаг итерации.

Если задача не имеет решения или решение существует, но его не удастся найти данным методом, сходимость итерационного процесса постепенно замедляется: убывание оценочной функции  $F$ , осуществляемое за один шаг, становится все меньше и меньше. Для оценки скорости сходимости итерационного процесса можно ввести величину:

$$\xi_s = \frac{F_{s-1} - F_s}{F_s}, \quad (3.4)$$

где  $F_{s-1}$  – значение функции  $F$  перед началом выполнения итерационного шага с порядковым номером  $s$ ;  $F_s$  – значение функции  $F$  после выполнения итерационного шага с порядковым номером  $s$ .

Дальнейшие итерации следует прекратить при выполнении условия  $\xi_s < \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  принимается равным какой-либо малой величине, например, 0,001.

Рассмотрим случай, когда количество коррекционных параметров превышает количество корригируемых функций  $t > k$ . При этом избыточные параметры можно использовать для уменьшения количества итерационных шагов, то есть для ускорения процесса расчета. Система линейных уравнений (3.2) в общем случае при  $t > k$  имеет бесчисленное множество решений. Для дополнения системы уравнений вводится требование минимальности взвешенной суммы квадратов приращений параметров  $\sum_{i=1}^{i=t} \sigma_i (\Delta p_i)^2$ , где  $\sigma_i$  – некоторые весовые коэффициенты.

Решение системы линейных уравнений при выполнении условия минимальности суммы  $\sum_{i=1}^{i=t} \sigma_i (\Delta p_i)^2$  осуществляется методом Лагранжа.

Подробности о выборе весовых коэффициентов и конкретном применении метода Лагранжа можно найти в [5]

### 3.4 Метод наименьших квадратов

Метод наименьших квадратов (МНК) используется при  $k > t$ , то есть когда число корригируемых функций больше числа параметров. В этом случае система линейных уравнений (3.2) переопределена и в общем случае не имеет решения. Поэтому когда число корригируемых функций  $k$  превышает количество коррекционных параметров  $t$ , нельзя требовать,

чтобы все функции  $\Phi_j$  приняли заданные значения. Задача считается решенной при минимуме вспомогательной функции (3.3), то есть при минимальном расстоянии от найденной в пространстве функций точки до заданной точки. Математически это можно выразить так:

$$\frac{\partial F}{\partial p_1} = \frac{\partial F}{\partial p_2} = \dots = \frac{\partial F}{\partial p_t} = 0 \quad (3.5)$$

Дифференцируя функцию  $F$  по  $p_i$ , получим:

$$\frac{\partial F}{\partial p_i} = 2 \sum_{j=1}^{j=k} \frac{1}{(\delta\Phi_j)^2} (\Phi_j - \bar{\Phi}_j) \frac{\partial \Phi_j}{\partial p_i} \quad (3.6)$$

Подставив в (3.6) значение  $\Phi_j$  из (3.1) и приняв во внимание (3.5), находим:

$$\sum_{j=1}^{j=k} \frac{1}{(\delta\Phi_j)^2} \left( \Phi_{j,0} + \sum_{j=1}^{j=k} \frac{\partial \Phi_j}{\partial p_i} \Delta p_i - \bar{\Phi}_j \right) \frac{\partial \Phi_j}{\partial p_i} = 0 \quad (3.7)$$

Количество уравнений (3.7) равно количеству коррекционных параметров  $t$ . Число неизвестных  $\Delta p_i$  также равно  $t$ . Таким образом, задача сведена к решению системы  $t$  линейных уравнений с  $t$  неизвестными. Выполнив элементарные преобразования уравнения (3.1), получим систему линейных уравнений:

$$\begin{aligned} & \Delta p_1 \sum_{j=1}^{j=k} \frac{1}{(\delta\Phi_j)^2} \left( \frac{\partial \Phi_j}{\partial p_1} \right)^2 + \Delta p_2 \sum_{j=1}^{j=k} \frac{1}{(\delta\Phi_j)^2} \frac{\partial \Phi_j}{\partial p_1} \frac{\partial \Phi_j}{\partial p_2} + \dots \\ & \dots + \Delta p_t \sum_{j=1}^{j=k} \frac{1}{(\delta\Phi_j)^2} \frac{\partial \Phi_j}{\partial p_1} \frac{\partial \Phi_j}{\partial p_t} = \sum_{j=1}^{j=k} \frac{1}{(\delta\Phi_j)^2} \frac{\partial \Phi_j}{\partial p_1} (\bar{\Phi}_j - \Phi_{j,0}) \\ & \dots \\ & \Delta p_1 \sum_{j=1}^{j=k} \frac{1}{(\delta\Phi_j)^2} \frac{\partial \Phi_j}{\partial p_t} \frac{\partial \Phi_j}{\partial p_1} + \Delta p_2 \sum_{j=1}^{j=k} \frac{1}{(\delta\Phi_j)^2} \frac{\partial \Phi_j}{\partial p_t} \frac{\partial \Phi_j}{\partial p_2} + \dots \\ & \dots + \Delta p_t \sum_{j=1}^{j=k} \frac{1}{(\delta\Phi_j)^2} \left( \frac{\partial \Phi_j}{\partial p_t} \right)^2 = \sum_{j=1}^{j=k} \frac{1}{(\delta\Phi_j)^2} \frac{\partial \Phi_j}{\partial p_t} (\bar{\Phi}_j - \Phi_{j,0}) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Заметим, что, как и в методе Ньютона, в методе наименьших квадратов хорошая сходимость итерационного процесса обеспечивается лишь при малых значениях изменений коррекционных параметров  $\Delta p_i$ , поскольку применимость системы уравнений (3.2) базируется на предположении существования линейной зависимости между изменениями параметров и функций. Во избежание расходимости итерационного процесса при автоматизированной коррекции оптических систем метод наименьших квадратов используется не в классическом, а в модифицированном виде.

### 3.5 Модификация метода наименьших квадратов.

Цель модификации – ограничить изменения коррекционных параметров на каждом итерационном шаге. Сущность модификации, предложенной Левенбергом, состоит в том, что в оценочную функцию  $F$  вводят дополнительно, кроме отклонений функций от заданных значений  $\Phi_j - \bar{\Phi}_j$ , изменения коррекционных параметров  $\Delta p_i$ . Тогда оценочная функция

$$\tilde{F} = \sum_{j=1}^{j=k} \left( \frac{\Phi_j - \bar{\Phi}_j}{\delta\Phi_j} \right)^2 + \sum_{i=1}^{i=t} k_i (\Delta p_i)^2 \quad (3.9)$$

где  $k_i$  – некоторые коэффициенты.

Дифференцируя эту оценочную функцию по  $p_i$  и приравнявая производные к нулю, получают систему линейных уравнений, решение которой и обеспечивает минимум оценочной функции  $\tilde{F}$ .

Вторая модификация метода наименьших квадратов заключается в том, что результат решения систем линейных уравнений (3.8) определяет направление движения в пространстве параметров, а величина шага в этом направлении устанавливается нахождением минимума функции  $F$ . Эта модификация имеет много общего с рассмотренной выше модификацией метода Ньютона.

Именно метод наименьших квадратов и его модификации чаще всего применяется для автоматизированной коррекции в программах расчета оптики (ОПАЛ, ZEMAX), хотя и не является оптимальным для всех случаев. В программах ОПАЛ, DEMOS предусмотрен выбор метода, применяемого при оптимизации, хотя, в отличие от программного комплекса SAPO, в рамках одного цикла оптимизации не предусмотрен автоматический переход и выбор метода коррекции.

### 3.6 Метод градиента

Этот метод применим при любом соотношении между количеством коррекционных параметров  $t$  и количеством корригируемых функций  $k$ . Задача автоматического расчета при этом сводится к определению значений коррекционных параметров  $p_i$ , при которых вспомогательная функция  $F$  имеет минимальное значение.

Нетрудно доказать (см., например [5]), что оценочная функция имеет максимальную скорость убывания, когда между изменениями коррекционных параметров  $\Delta p_i$  имеется соотношение:

$$\begin{aligned}\Delta p_1 &= -\psi \frac{\partial F}{\partial p_1}, \\ \Delta p_2 &= -\psi \frac{\partial F}{\partial p_2}, \\ &\dots \\ \Delta p_t &= -\psi \frac{\partial F}{\partial p_t},\end{aligned}\tag{3.10}$$

где  $\psi > 0$ .

Значения производных  $\partial F / \partial p_i$  определяются по формуле (3.6). Минимум функции  $F$  при движении по направлению в пространстве параметров, устанавливаемому из соотношения (3.10), определяется, как и в рассмотренных методах, нахождением значения величины  $\psi_e$ , соответствующей этому минимуму.

По сравнению с методом Ньютона и методом наименьших квадратов метод градиента в большинстве случаев дает худшую сходимость. Однако его целесообразно использовать в качестве вспомогательного метода в тех случаях, когда модифицированные методы Ньютона или наименьших квадратов не дают положительных результатов.

### 3.7 Метод Лагранжа

При  $k < t$  применяется метод Лагранжа. Система уравнений (3.1) в этом случае переопределена и имеет множество решений. Для дополнения системы уравнений (3.1) вводится требование минимальности взвешенной суммы квадратов приращений параметров  $p_i$ :

$$P = \sum_{i=1}^{i=t} \sigma_i (\Delta p_i)^2.\tag{3.11}$$

Весовые коэффициенты  $\sigma_i$  принимаются равными сумме абсолютных значений производных

$$\sigma_i = \sum_{j=1}^{j=k} \left| \frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial p_i^2} \right|.\tag{3.12}$$

Расчет производных  $\partial^2 \Phi_j / \partial p_i^2$  осуществляется одновременно с расчетом первых производных методом конечных разностей.

При выполнении автоматизированной коррекции определяется минимальное значение квадратичной формы (3.11) при выполнении условия (3.1). В результате имеем систему из  $k+t$  линейных уравнений с  $k+t$  неизвестными, из которых первые  $t$  – искомые приращения параметров  $\Delta p_i$ , а остальные  $k$  – произвольные коэффициенты Лагранжа  $\lambda_j$ . Система уравнений в матричной форме имеет следующий вид:

$$C\mathbf{y} = \mathbf{f}\tag{3.13}$$

где  $y$  – вектор столбец неизвестных, в котором  $t$  первых компонент –  $\Delta p_i$ , остальные  $k$  компонент – множители Лагранжа  $\lambda_j$ ;  $\varphi$  – вектор-столбец,  $t$  первых компонент которого совпадают с компонентами вектора  $\Delta\Phi$  системы (3.1), а остальные  $k$  компонент – нули;  $C$  – матрица следующей структуры:

$$\left| \begin{array}{cccccc} & & A & & & 0 \\ \sigma_1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 & 0 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & 0 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \dots & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \sigma_t \end{array} \right| A^T.$$

Решая систему уравнений (3.13), получаем множители Лагранжа и вектор приращений параметров  $\Delta p$ .

### 3.8 Особенности программного комплекса для расчета оптических систем САРО (Система Автоматизированного Расчета Оптики)

Система САРО имеет принципиальные отличия перед известными аналогичными комплексами, в частности, ОПАЛ, ZEMAX, DEMOS. Первое отличие заключается в постановке задачи для автоматизированной коррекции (оптимизации). В процессе оптимизации необходимо получить численные значения коррекционных параметров (радиусов, толщин, марок стекол) системы, обладающей заданными численными значениями aberrаций и параксиальных характеристик  $\bar{\Phi}_j$  с заданными допусками  $\delta\Phi_j$ , в том числе и связанных между собой  $\Phi_{j+1} + \Phi_j = \bar{\Phi}_j$  и  $\Phi_{j+1} - \Phi_j = \bar{\Phi}_j$ .

При этом обычно в других программах используется оценочная функция:

$$F = \sum_j a_j (\Delta\Phi_j)^2,$$

где  $\Delta\Phi_j$  – aberrация,  $a_j$  – весовой коэффициент. Минимизация этой оценочной функции и является задачей оптимизации. В программе САРО используется аналогичная функция:

$$F = \sum_j \frac{(\Phi_j - \bar{\Phi}_j)^2}{\delta\Phi_j^2},$$

где  $\delta\Phi_j$  – допуск (единица измерения корректируемой величины), используется для расчета величины итерационного шага при автоматизированной коррекции.

Такой подход к автоматизированной коррекции позволяет использовать знание теории aberrаций, за счет чего достигается оптимальная коррекция.

Автоматизированная коррекция в САРО осуществляется в два этапа: на первом этапе осуществляется поиск соотношения между изменениями коррекционных параметров  $\Delta\rho$ , при котором достигается скорейшее убывание оценочной функции, то есть фактически направление движения. На втором этапе в систему вводятся изменения параметров с учетом некоторого коэффициента, который определяет величину шага в найденном направлении.

Важным преимуществом комплекса САРО является возможность использования в качестве коррекционных параметров углов первого параксиального луча  $\alpha$  вместо радиусов (кривизны) оптических поверхностей [16]. Кроме того, в программе САРО предусмотрена автоматизированная коррекция aberrаций третьего порядка (самих aberrаций, а не связанных с ними коэффициентов), в том числе сферической aberrации в зрачках.

Выдача численных результатов расчета хода лучей в САРО осуществляется в виде больших таблиц, занимающих несколько экранов. Для специалистов этот способ представляет большие удобства, так как позволяет оценить aberrации на всем поле изображения. Для обучающихся обилие информации вызывает затруднения в осознании полученных результатов.

Недостатком комплекса САРО является наличие обозначений только в виде заглавных латинских букв, что обусловлено тем, что первоначально программа была разработана для ЭВМ БЭСМ-6. Ограниченный объем оперативной памяти БЭСМ-6 и старых персональных компьютеров привел к ограниченной точности вычислений при определении характеристик, требующих выполнения операций интегрирования (функции концентрации энергии, частотно-контрастной характеристики, распределение освещенности в дифракционном пятне рассеяния изображения точки).

### **3.9 Выбор корректируемых функций**

В большинстве случаев полная коррекция какой-либо оптической системы представляет собой процесс, состоящей из ряда этапов, каждый из которых характеризуется различным набором условий, предъявляемых к системе. Такими условиями, в частности, являются определенные требования к aberrациям. Выбор конкретных aberrаций на каждом этапе этого процесса является творческим элементом деятельности разработчика, активно влияющего на ход коррекции оптической системы.

При выборе aberrаций, подлежащих коррекции, в первую очередь необходимо учитывать назначение оптической системы, а также коррекционные возможности выбранной конструкции. Так, при коррекции обычных объективов микроскопов коррекция дисторсии является нецелесообразной, так как благодаря малому полю зрения такая aberrация заведомо мала. В подавляющем большинстве осветительных систем достаточно ограничиться коррекцией сферической aberrации и комы. При расчете визуальных окуляров зачастую можно не корригировать сферическую aberrацию, которая обычно мала из-за небольшого относительного отверстия окуляров. Коррекция избыточных aberrаций является наиболее часто встречающейся ошибкой разработчиков оптических систем, приводящей к отрицательным результатам.

Зная коррекционные возможности оптических систем, представляющих собой тонкие компоненты, нельзя при небольших полях зрения требовать в них одновременного исправления сферической aberrации, комы и астигматизма.

При расчете нужно установить необходимое и достаточное количество корригируемых функций – aberrаций. Опыт показывает, что это количество целесообразно определять постепенно, начав с минимально необходимого. В случае монотонных зависимостей между aberrациями и координатами точек пересечения лучей с плоскостью предмета  $l$  и плоскостью входного зрачка  $H_x$  и  $H_y$ , наибольшие aberrации будут соответствовать предельным значениям апертуры и поля. Поэтому на первой стадии расчета следует ограничиться коррекцией aberrаций для предельных значений этих величин. Затем требуется уточнить, не превышают ли aberrации для промежуточных значений  $l$ ,  $H_x$  и  $H_y$  допустимых значений. Если превышают, то необходимо провести дальнейшую коррекцию, соответственно увеличив количество корригируемых функций.

Возможен и другой подход к решению задачи. Уже на первой стадии расчета можно задать количество корригируемых функций столь большим, что появление значительных aberrаций для промежуточных значений  $l$ ,  $H_x$  и  $H_y$  станет маловероятным. Однако, при таком подходе невозможно установить, какие именно aberrации не поддаются коррекции.

На начальной стадии расчета, когда aberrационные свойства корригируемой системы, как правило, неизвестны, целесообразно принимать заданные значения aberrаций равными нулю. На более поздних стадиях коррекции зачастую, с целью перебалансировки aberrаций для получения оптимального качества изображения, эти значения задают отличными от нуля.

Допуски для заданных значений aberrаций рекомендуется назначать, исходя из реальной потребности. Однако следует иметь в виду, что с помощью изменения допусков (весовых коэффициентов) можно влиять на

результат автоматизированной коррекции. Если в результате работы программы все корригируемые функции, кроме одной, получили заданные значения, то целесообразно повторить коррекцию, задав более жесткий допуск на эту функцию. В соответствии с (3.9) и (3.10) при использовании метода наименьших квадратов и градиентного метода от допуска  $\delta\Phi_j$  зависит выбор направления движения в пространстве параметров. Выбор шага зависит от  $\delta\Phi_j$  во всех случаях при применении любых рассмотренных выше методов коррекции. Таким образом, при числе корригируемых функций, большем числа коррекционных параметров ( $k > t$ ) четко проявляется зависимость результатов автоматизированного расчета от допуска  $\delta\Phi_j$  (от весовых коэффициентов).

### 3.10 Выбор коррекционных параметров

В современных программах автоматизированной коррекции оптическая система может быть задана как через радиусы оптических поверхностей ( $r_i$ ), так и через углы первого параксиального луча с осью  $\alpha_i$  (ОПАЛ, САРО). Коррекционными параметрами могут быть как радиусы оптических поверхностей (точнее, обратная величина – кривизна  $\rho_i = 1/r_i$ ), так и углы  $\alpha_i$ . Следует отметить, что использование в качестве коррекционных параметров углов первого параксиального луча с осью предусмотрено только в программе САРО. Программа ОПАЛ предусматривает описание системы с помощью этих углов, однако не поддерживает возможность автоматизированной коррекции с помощью этих параметров. Такие программные комплексы как *ZEMAX*, *DEMOS* не имеют непосредственной возможности описания и коррекции оптических систем с помощью углов первого параксиального луча.

Непосредственное использование радиусов кривизны  $r_i$  в качестве коррекционных параметров нерационально, так как при  $r_i = \infty$  производные от корригируемых функций (абберации и параксиальные характеристики системы) по  $r_i$  обращаются в 0, в результате чего данный радиус перестает изменяться, а следовательно, быть коррекционным параметром. Поэтому в качестве коррекционных параметров в программах, как правило, применяются кривизна оптических поверхностей  $\rho_i$ . Диапазон абсолютных значений  $\rho_i$  ограничен и составляет от 0 до нескольких единиц. Кроме того, использование  $\rho_i$  удобно также и потому, что в формулах расчета лучей на ЭВМ применяются именно эти величины, а не непосредственно радиусы.

На практике использование параметров  $\alpha_i$  в качестве коррекционных параметров является предпочтительным и иногда дает лучшие результаты, чем  $\rho_i$ . При описании системы углами первого параксиального луча  $\alpha_i$  обеспечивается получение требуемого увеличения  $V_0$ , если предмет расположен на конечном расстоянии, или требуемого значения фокусного

расстояния  $f'_0$ , если предмет бесконечно удален. Для этого достаточно выполнить условия:

$$n_1 \alpha_1 / (n_{p+1} \alpha_{p+1}) = V_0 \text{ при } s_1 \neq \infty \quad (3.14)$$

$$h_1 / \alpha_{p+1} = f'_0 \text{ при } s_1 = \infty \quad (3.15)$$

где  $p$  – число поверхностей в оптической системе,  $h_1$  – высота первого параксиального луча на первой поверхности,  $n_1$  и  $n_{p+1}$  – соответственно показатели преломления сред пространства предметов и изображений. Сохраняя неизменными величины, входящие в левые части уравнений (3.14) и (3.15), обеспечиваем постоянство этих оптических характеристик в процессе автоматизированной коррекции системы.

Задание системы через  $\alpha_i$  позволяет также сохранить апланатичность заданных поверхностей, концентричность и конфокальность, обеспечить строгую телескопичность (афокальность) системы в целом или ее частей.

Однако, при коррекции коллективов, а также окуляров, где коллектив может входить в состав оптической системы окулярной части, использование углов первого параксиального луча с осью становится невозможным, так как высота первого параксиального луча практически равна нулю, что приводит к неопределенности при расчете радиусов поверхностей.

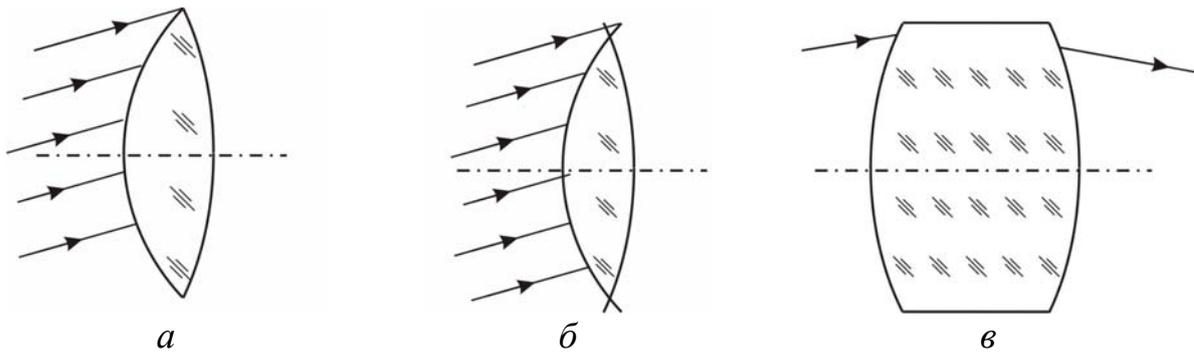
В качестве коррекционных параметров могут быть использованы также толщины линз, воздушные промежутки, показатели преломления для основной длины волны, дисперсии, коэффициенты в уравнениях асферических поверхностей, положение плоскости изображения, положение зрачка (апертурной диафрагмы).

Как показывает практика, толщины линз и величины воздушных промежутков далеко не всегда являются активными коррекционными параметрами. Кроме того, их значения всегда ограничены по конструктивным соображениям.

Для того чтобы значения коррекционных параметров не выходили за границы некоторых известных интервалов, в программах автоматизированной коррекции предусмотрено задание ограничений:

$$p_{i \min} \leq p_i \leq p_{i \max},$$

где  $p_{i \min}$ ,  $p_{i \max}$  – соответственно наибольшее и наименьшее допустимые значения параметра, которые задаются разработчиком оптической системы.



*Рис.3.2 Результаты коррекции при использовании в качестве параметра толщины линз без ограничений этого параметра*

Ограничения практически всегда необходимо накладывать на значения толщин и воздушных промежутков при использовании их в качестве коррекционных параметров. При отсутствии ограничений полученное значение воздушного промежутка или толщины линзы может привести к недопустимым габаритам системы или к нереализуемому варианту системы. Толщины линз могут в процессе коррекции оказаться слишком малыми с точки зрения технологичности изготовления. На рис. 3.2а показан вариант линзы с так называемым острым краем. Малые толщины могут приводить к виньетированию (рис.3.2б), которое может быть недопустимо по условиям технического задания. Толщины в процессе коррекции могут оказаться слишком большими (рис.3.2в), что в некоторых случаях приводит к неоправданно большим затратам материала при изготовлении и увеличению светопоглощения.

Кроме ограничений толщины линз и воздушных промежутков по оси в некоторых программах (например, *ZEMAX*) предусмотрена возможность ограничения толщины линзы и значения воздушного промежутка для крайнего луча, что очень важно с точки зрения конструктивной реализуемости, особенно в крупногабаритной оптике

При использовании в качестве коррекционных параметров показателей преломления следует иметь в виду, что значения показателей преломления лежат внутри довольно узкого интервала, установленного ГОСТ 3514-94, и могут принимать только дискретные значения в соответствии с тем же ГОСТом, кроме случая использования градиентных оптических элементов, где показатель преломления изменяется от точки к точке внутри образца по определенному закону. Однако при этом необходимо следить за перепадом  $\Delta n$ , так как не любое его значение технологически реализуемо.

При использовании показателей преломления основного цвета в качестве коррекционных параметров обычно задают ограничения  $n_{min}=1,47$  и  $n_{max}=1,806$  по ГОСТ 3514-94. После выполнения коррекции полученные расчетные значения показателей преломления заменяют на ближайšie, предусмотренные этим стандартом.

В программе *ZEMAX* предусмотрена коррекция с возможностью перебора марок стекол, имеющих в каталоге стекла, который указал пользователь. В этом случае происходит обычная автоматизированная коррекция за исключением того, что указанные для изменения материалы перебираются в рамках каталога. Однако такая коррекция занимает достаточно много времени.

Среди ограничений необходимо упомянуть дополнительные связи между параметрами, которые необходимо определять перед этапом коррекции системы. Например, симметричный окуляр состоит из двух симметрично расположенных склеенных компонентов (рис.3.3). При коррекции необходимо описать свойство симметрии такой системы, поскольку в противном случае коррекция приведет к нарушению симметрии системы. Для окуляра, показанного на рис. 3.3 необходимо дополнительно определить связи:  $r_1 = -r_6$ ,  $r_2 = -r_5$ ,  $r_3 = -r_4$ .

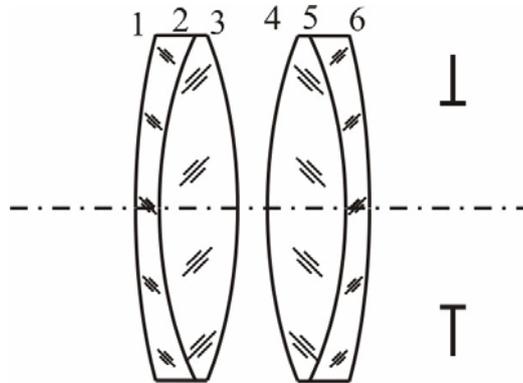


Рис. 3.3 Симметричный окуляр

Наложение дополнительных связей часто необходимо в зеркальных и зеркально-линзовых системах, где один луч может встречать одну и ту же поверхность несколько раз. В этом случае при описании в программе поверхность задается столько раз, сколько раз с ней сталкивается луч. При коррекции в случае отсутствия ограничений система может стать нереализуемой, поэтому необходимо связать параметры. Так, например, в системе типа зеркала Манжана (рис. 3.4) необходимо выполнение условий  $r_1 = r_3$ ,  $d_1 = -d_2$ .

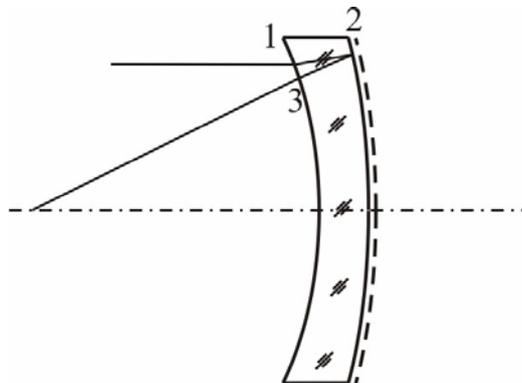


Рис. 3.4 Зеркало Манжана

При выборе коррекционных параметров в системах, свойства которых неизвестны, иногда целесообразно предварительно произвести расчет и изучение влияния изменения параметров (или производных) на аберрации. При этом нетрудно выделить параметры, изменения которых в допустимых пределах не могут вызвать существенных изменений корригируемых функций. Такие параметры не являются активными, и их не следует использовать в качестве коррекционных. Простейшим примером являются толщины линзы в двойном склеенном объективе при коррекции аберраций осевой точки: толщины практически не влияют на аберрации [2].

### **3.11 Приемы автоматизированной коррекции аберраций**

#### **3.11.1 Метод последовательной коррекции аберраций**

Наличие нелинейных зависимостей между изменениями аберраций и изменением коррекционных параметров иногда приводит к появлению локальных минимумов оценочной функции, препятствующих нахождению положительного решения при автоматизированной коррекции оптических систем. Для преодоления этих локальных минимумов можно пользоваться методами глобальной оптимизации, предусмотренными в некоторых программных комплексах для расчета оптических систем (*ZEMAX*, *CODE V*), однако, эти алгоритмы достаточно сложны и требуют значительного времени. Для преодоления локальных минимумов можно рекомендовать метод последовательной коррекции аберраций [2]. Сущность метода заключается в том, что коррекция необходимых аберраций осуществляется не одновременно, а постепенно: сначала корригируют аберрации, зависящие от коррекционных параметров более линейно, чем остальные, и требующие для коррекции больших изменений коррекционных параметров. Затем количество корригируемых функций (аббераций) увеличивается, а в случае необходимости добавляются все новые и новые аберрации. Этот метод также позволяет определить, какие из новых аберраций не поддаются коррекции, и принять определенные конструктивные меры, например, ввести дополнительные коррекционные элементы, позволяющие исправить нужные аберрации. Если же коррекция всех необходимых аберраций осуществляется одновременно, то установить, какие аберрации препятствуют дальнейшей коррекции, зачастую невозможно.

Рассмотрим пример. Требуется скорректировать аберрации малого поля в системе, предназначенной для переноса изображения, даваемого объективом микроскопа, с увеличением –  $1,5^{\times}$ . Аберрации должны быть исправлены в фиолетовой области спектра  $\lambda = 420 \div 460$  нм. За основную длину волны примем  $\lambda = 435$  нм (линия g). В качестве материала линз необходимо использовать кварцевое стекло и флюорит, обеспечивающие минимальную люминесценцию в используемой области спектра.

Расстояние от первой поверхности системы до предмета должно составлять – 120 мм. Корректируемыми функциями являются: поперечная сферическая aberrация для края апертуры  $\sin \sigma_1 = -0,03$  ( $\Phi_1$ ), отступление от условия изопланатизма для такого же значения апертуры ( $\Phi_2$ ), хроматизм положения в поперечной мере для апертуры  $\sin \sigma_2 = -0,021$  ( $\Phi_3$ ).

Простейшей системой, которая может удовлетворить поставленным требованиям, является объектив, состоящий из двух несклеенных линз, поскольку используемые материалы (флюорит и кварцевое стекло) имеют разные коэффициенты термического расширения, что не позволяет их склеить. В качестве коррекционных параметров примем углы первого параксиального луча с осью  $\alpha_i$ , за исключением  $\alpha_1$  и  $\alpha_5$ , которые обеспечивают выполнение габаритных условий: положения предмета от первой поверхности и увеличения. Конструктивные параметры исходной оптической системы, взятые произвольно, приведены в табл. 3.1. Там же даны значения корректируемых функций. Результаты автоматизированной коррекции всех трех aberrаций одновременно приведены в столбце для  $\Phi_j$  оконч.

Табл. 3.1 Результаты автоматизированной коррекции при использовании трех корректируемых функций

$i$	$\alpha_i$ исх	$\alpha_i$ оконч	$\bar{\Phi}_j$
1	1	1	$\bar{\Phi}_1 = 0 \pm 0,0001$ $\bar{\Phi}_2 = 0 \pm 0,0001$ $\bar{\Phi}_3 = 0 \pm 0,0001$
2	0,6	0,438	
3	0,2	-0,1974	
4	-0,2	-0,4704	
5	-0,667	-0,667	
$j$	$\Phi_j$ исх	$\Phi_j$ оконч	
1	-0,0075	-0,012	
2	-0,0001	-0,0001	
3	-0,0392	-0,036	
$d_1 = 3$		$n_2 = 1,43959$ (флюорит)	
$d_2 = 1$		$n_3 = 1$	
$d_3 = 3$		$n_4 = 1,46681$ (кварцевое стекло)	

В таблицах 3.2, 3.3 приведены aberrации осевого пучка систем до коррекции и после одновременной коррекции всех трех функций.

Табл. 3.2 Аберрации осевого пучка системы до коррекции

<b>H</b>	<b>tgσ'</b>	<b>Δy'(0)</b>	<b>w(0)</b>	<b>η, %</b>	<b>Δy'(2-1)</b>
3,60	0,0201	-0,0075	-0,0864	-0,0085	-0,0555
3,12	0,0174	-0,0049	-0,0485	-0,0064	-0,0481
2,55	0,0142	-0,0026	-0,0216	-0,0043	-0,0392
1,80	0,0100	-0,00094	-0,0054	-0,0022	-0,0277
0	0	0	0	0	0

Табл. 3.3 Аберрации осевого пучка системы после коррекции

<b>H</b>	<b>tgσ'</b>	<b>Δy'(0)</b>	<b>w(0)</b>	<b>η, %</b>	<b>Δy'(2-1)</b>
3,60	0,0201	<b>-0,0117</b>	-0,135	-0,0075	-0,0511
3,12	0,0174	-0,0076	-0,0756	-0,0057	-0,0443
2,55	0,0142	-0,0041	-0,0335	-0,0038	<b>-0,0361</b>
1,80	0,0100	-0,0015	-0,0084	-0,0019	-0,0255
0	0	0	0	0	0

В таблице 3.3 жирным шрифтом выделены значения, выходящие за пределы допустимых значений.

Проанализируем причины отсутствия положительного решения. Поскольку оптические силы линз

$$\varphi_I \approx (\alpha_3 - \alpha_1) / h,$$

$$\varphi_{II} \approx (\alpha_5 - \alpha_3) / h,$$

то нетрудно видеть, что в исходной системе и системе, полученной после коррекции, обе линзы являются положительными. Поэтому можно считать, что коррекции препятствует локальный минимум сферической аберрации. Система представляет собой двухлинзовую систему, линзы которой скорректированы на минимум сферической аберрации. В исходной системе и в системе после коррекции отступление от условия изопланатизма имеет значение, не превышающее допуск. Для коррекции хроматизма положения необходимо, чтобы первая линза, выполненная из флюорита, была бы положительной, а вторая линза, выполненная из кварцевого стекла, была бы отрицательной. Для исправления хроматизма требуется, по-видимому, значительное изменение параметра  $\alpha_3$ , который определяет оптические силы линз.

Данное положение проверяется с помощью коррекции только одной сферической аберрации с использованием всех трех коррекционных параметров. Результаты приведены в табл. 3.4.

Табл. 3.4 Результаты автоматизированной коррекции сферической аберрации

$i$	$\alpha_{i \text{ исх}}$	$\alpha_{i \text{ оконч}}$
1	1	1
2	0,6	0,66765
3	0,2	0,18824
4	-0,2	-0,2698
5	-0,667	-0,667
$\Phi_1$	-0,0075	-0,0070
$\Phi_2$	-0,0001	-0,0001
$\Phi_3$	-0,039	-0,039

Из таблицы 3.4 видно, что сферическая аберрация практически не поддается коррекции. Выполним коррекцию в два этапа: на первом этапе осуществим исправление одной хроматической аберрации с использованием всех трех коррекционных параметров, на втором этапе – коррекцию всех трех аберраций, причем за исходную примем систему, полученную на первом этапе.

Табл. 3.5. Результаты поэтапной автоматизированной коррекции

$i$	Этап		
	1		2
	$\alpha_{i \text{ исх}}$	$\alpha_{i \text{ оконч}}$	$\alpha_{i \text{ оконч}}$
1	1	1	1
2	0,6	-0,03148	-1,3287
3	0,2	-6,74448	-6,87226
4	-0,2	0,42361	-0,8817
5	-0,667	-0,667	-0,667
$\Phi_1$	-0,0075	-0,0953	0
$\Phi_2$	-0,0001	0,0139	0
$\Phi_3$	-0,0392	0,0000075	0

В таблице 3.6 приведены аберрации осевого пучка системы, полученной в результате последовательной (поэтапной) коррекции.

Табл. 3.6 Аберрации осевого пучка системы после поэтапной коррекции

$H$	$\text{tg}\sigma'$	$\Delta y'(0)$	$w(0)$	$\eta, \%$	$\Delta y'(2-1)$
3,60	0,0200	-0,00008	0,2	0,00316	-0,00229
3,12	0,0173	0,0105	0,158	-0,0354	-0,000695
2,55	0,0141	0,00905	0,0828	-0,0442	0,0000014
1,80	0,00999	0,00383	0,0226	-0,0306	0,000183
0	0	0	0	0	0

В результате получена система, в которой скорректированы все три рассматриваемые аберрации. Таким образом, последовательная коррекция

позволила обойти локальный минимум оценочной функции в исходной системе.

### 3.11.2 Метод целенаправленного изменения параметров исходной оптической системы

Рассмотрим пример. Требуется рассчитать двухсклеенный объектив ( $f' = 100$ ,  $K = 3,33$ ) с оптимальным исправлением сферической aberrации. Конструктивные параметры исходной оптической системы, состоящей из выпукло-плоской линзы из крона К8 и плоскопараллельной пластины из тяжелого флинта ТФ1, приведены в таблице 3.4.

Очевидно, что  $\alpha_3 = 1/n_3 = 0,60698$ , а  $\alpha_2 = 1/n_2 = 0,6595$ . Известно, что минимум сферической aberrации у одиночной линзы имеет место, когда ее форма близка к выпукло-плоской. Тонкая плоскопараллельная пластина, которая в исходной системе играет роль второй линзы, обладает малой сферической aberrацией. Поэтому можно ожидать, что исходная оптическая система близка к системе, обладающей минимальным (в локальной области) значением сферической aberrации. Это предположение проверяется путем автоматизированной коррекции.

Табл. 3.4 Результаты автоматизированной коррекции двухсклеенного объектива

$\alpha_i$ исх	$d$	Марка стекла	$\alpha_i$ оконч	$\bar{\Phi}_j$
0			0	$\bar{\Phi}_1 = 0 \pm 0,001$
0,6595	7	К8	0,4895	$\bar{\Phi}_2 = 0 \pm 0,001$
0,60698	3	ТФ1	0,5818	
1			1	
$\Phi_1$	-0,387		-0,254	
$\Phi_2$	-0,132		-0,0878	

В качестве коррекционных параметров используются углы  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ . Корректируемые функции – поперечная сферическая aberrация на краю отверстия при  $H_1 = 15$  ( $\Phi_1$ ) и на зоне при  $H_3 = 15\sqrt{0.5}$  ( $\Phi_2$ ). Заданные значения  $\bar{\Phi}_j$ , а также допуски на них даны в табл.3.4. В результате автоматизированной коррекции получена система, данные которой приведены в табл. 3.4 в столбце  $\alpha_i$  оконч. На рис. 3.5а, б приведены схемы системы до и после коррекции.

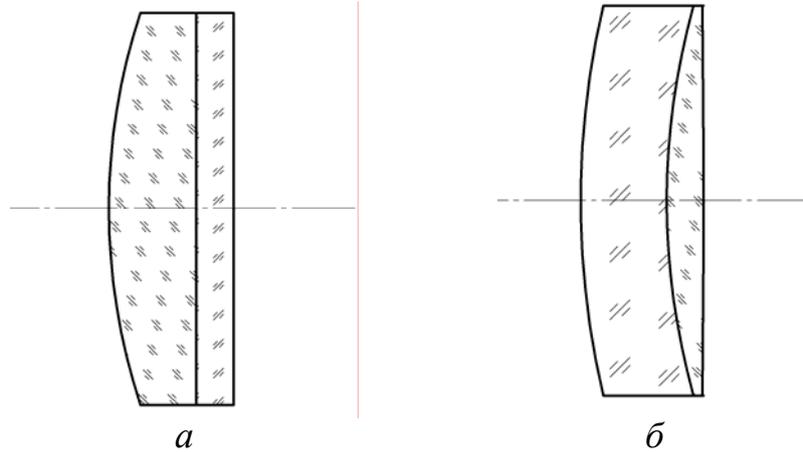


Рис. 3.5 Вид системы до и после коррекции

Нетрудно видеть, что оптимальная коррекция не достигнута. Первая линза в результате коррекции стала отрицательной, вторая – положительной, в то время как при оптимальной коррекции распределение оптических сил обратное. Как и предполагалось, достигнут локальный минимум сферической аберрации, перейти от которого к глобальному минимуму путем постепенных изменений конструктивных параметров при непрерывном уменьшении оценочной функции  $F$  невозможно. Следовательно, необходимо изменить параметры исходной оптической системы. Так как заранее известно, что объектив должен состоять из первой положительной, а второй отрицательной линз, то изменим один из углов, например,  $\alpha_3$  так, чтобы оптическая сила первой линзы была положительной, больше оптической силы всего объектива. Выполняя элементарные преобразования формул параксиальной оптики, получим соотношение:

$$\alpha_3 = \frac{\alpha_2 n_2 (n_3 - 1) - \tilde{\alpha}_3 n_3 (n_3 - n_2)}{n_3 (n_2 - 1)},$$

где  $\tilde{\alpha}_3$  – угол первого параксиального луча в пространстве между линзами при условии введения бесконечно тонкого воздушного промежутка. Очевидно, что относительная оптическая сила первой линзы  $\varphi_1 = \tilde{\alpha}_3$ . Примем  $\varphi_1 = 1,5$ , тогда нетрудно получить, что в рассматриваемом примере  $\alpha_3 = 0,381$ . Угол  $\alpha_2$  сохраняет свое первоначальное значение, равное 0,6595. В результате автоматизированной коррекции данной исходной системы получен объектив, данные которого приведены в таблице 3.5. Таким образом, получена система с оптимальным исправлением сферической аберрации [2].

Табл. 3.5 Результаты автоматизированной коррекции двухсклеенного объектива

$\alpha_i$ исх	$d$	Марка стекла	$\alpha_i$ оконч	$\bar{\Phi}_j$
0			0	$\bar{\Phi}_1 = 0 \pm 0,001$
0,6595	7	К8	0,61788	$\bar{\Phi}_2 = 0 \pm 0,001$
0,381	3	ТФ1	0,39892	
1			1	
$\Phi_1$	0,568		0,00293	
$\Phi_2$	0,150		-0,0104	

В таблице 3.6 приведены значения поперечной аберрации системы до коррекции, после коррекции системы из плосковыпуклой линзы и плоскопараллельной пластины и после изменения параметров исходной системы и коррекции.

Табл. 3.6 Аберрации осевого пучка систем

	До коррекции	После коррекции	После изменения параметров и коррекции
$H$	$\Delta y'(0)$	$\Delta y'(0)$	$\Delta y'(0)$
15	-0,387	-0,254	0,00293
13	-0,247	-0,163	-0,0092
10,6	-0,132	-0,0878	-0,0104
7,5	-0,0460	-0,0307	-0,0053

На рис. 3.6 приведен вид системы после коррекции при целенаправленном изменении параметров исходной системы.

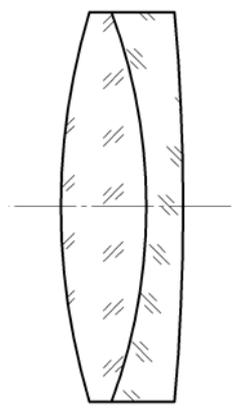


Рис. 3.6 Вид системы после коррекции с целенаправленным изменением параметров

Кроме метода целенаправленного изменения параметров системы также применяется метод случайного изменения параметров исходной оптической системы. В этом случае в исходной схеме произвольно изменяют случайно выбранный параметр и повторяют коррекцию. Часто этот прием также позволяет преодолеть локальный минимум и улучшить аберрационные характеристики системы [2].

Таким образом, поскольку в основе методов автоматизированной коррекции лежат итерационные способы, то нет гарантии нахождения решения даже в тех случаях, когда оно существует. Это связано также и с тем, что автоматизированная коррекция чаще всего представляет собой так называемую локальную оптимизацию, то есть поиск ближайшего минимума. При неудачном выборе значений параметров исходной оптической системы, при неудачном назначении требуемых значений корригируемых функций или допусков (весовых коэффициентов) на них, а также при неудачном выборе коррекционных параметров возможны случаи, когда программа обеспечивает нахождение ближайшего локального минимума оценочной функции  $F$ , не удовлетворяющего поставленным требованиям, хотя нужное решение и существует.

#### 4. Расчет оптических систем

Рассмотрим свойства и приемы расчета некоторых типов оптических систем.

##### 4.1 Аберрационные свойства и расчет объектива, склеенного из двух линз

Системы, склеенные из двух линз, широко применяются как в качестве самостоятельных объективов, так и в качестве составных частей более сложных систем.

При использовании системы в качестве объектива зрительной трубы в нем исправляется сферическая aberrация и кома при одновременном исправлении хроматической aberrации. Однако вследствие наличия aberrаций высших порядков двухлинзовые склеенные объективы не могут иметь относительные отверстия больше 1:4 при фокусных расстояниях более 150 мм, 1:5 при фокусных расстояниях до 300 мм, 1:6 – до 500 мм, 1:8 – 1:10 – до 1000 мм [11].

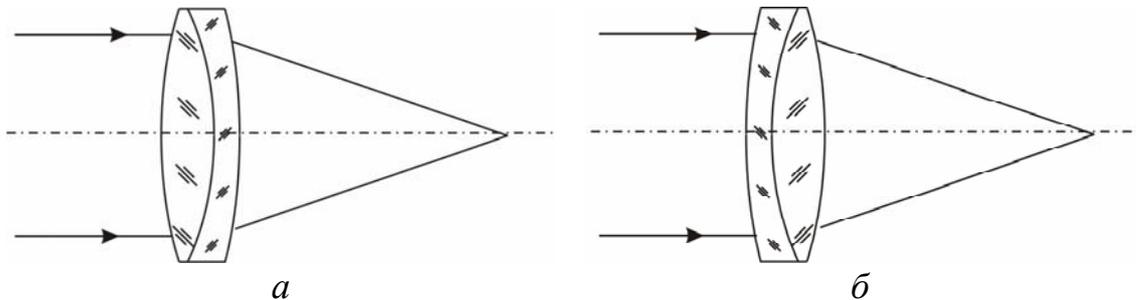


Рис. 4.1. Двухлинзовый склеенный объектив:  
а) «крон впереди» б) «флинт впереди»

Угловое поле этих систем не должно превышать  $10 - 12^\circ$  при малых фокусных расстояниях, а при больших  $7 - 10^\circ$ . Двухлинзовые склеенные системы особенно пригодны в качестве объективов и оборачивающих систем, когда падающие лучи параллельны. Гораздо худшие результаты получаются при увеличениях, близких к  $V = -1$ ; в этом случае выгодно применять два близко расположенных объектива с параллельным ходом лучей между ними.

Двухлинзовые склеенные системы могут быть довольно хорошо исправлены в отношении астигматизма, если только входной зрачок не совпадает с оправой системы. В этом случае они могут применяться как половинки симметричных фотографических объективов, например, объективы типа апланат; половинки апланатов плохо исправлены в отношении сферической aberrации и кривизны поля.

Если объектив, склеенный из двух линз, выполняет не самостоятельную функцию, а используется как элемент оптической системы зрительной трубы, то он не исправлен полностью на aberrации осевой точки. В трубе с призменной оборачивающей системой объектив компенсирует сферическую aberrацию, хроматизм положения и

отступление от условия изопланатизма окуляра и призм. При использовании компонента из двух склеенных линз в качестве элемента оборачивающей системы на него возлагается функции коррекции астигматизма зрительной трубы. В первом случае входной зрачок (апертурная диафрагма) совпадает с объективом и поэтому в соответствии с теорией aberrаций третьего порядка бесконечно тонких систем (по терминологии Г.Г. Слюсарева) свободен от хроматизма увеличения и дисторсии, но обладает принципиально неустранимым астигматизмом и кривизной изображения, в результате чего составляющие астигматизма  $Z'_m$  и  $Z'_s$  независимо от конструктивных параметров определяются выражениями (2.8), (2.9), а стрелка кривизны поверхности изображения – выражением (2.7).

Если склеенный объектив выполняет роль элемента оборачивающей системы, то, как правило, входной зрачок для него вынесен на некоторое расстояние  $a_p$ . При таком условии появляется возможность воздействовать на астигматизм путем введения комы, то есть основного параметра  $W^* \neq 0$  (см. формулы (2.10) – (2.13), принимая во внимание, что  $t \neq 0$ ). При объединении половин в оборачивающую систему с параллельным ходом лучей между ними, благодаря симметрии системы, кома и дисторсия автоматически устраняются. В этом случае из технологических соображений целесообразно устранить сферическую aberrацию и хроматизм положения, то есть принять значения основных параметров  $P^* = C^* = 0$ .

Один из методов расчета склеенных компонентов заключается в следующем. На начальной стадии расчета влиянием толщин линз можно пренебречь, поэтому при расчете двухлинзового склеенного компонента эффективна методика, основанная на применении теории aberrаций третьего порядка для систем, состоящих из тонких компонентов, которая разработана проф. Г. Г. Слюсаревым [11, 17]. Суть расчета заключается в составлении и решении нескольких линейных уравнений относительно основных параметров тонких компонентов  $P^*$ ,  $W^*$  и  $C^*$ , по найденным значениям основных параметров определяются конструктивные параметры и проводится контрольный расчет хода лучей.

По методике Г.Г.Слюсарева для расчета объектива, склеенного из двух линз (по его терминологии «двухлинзового склеенного объектива»), на первом этапе расчета, исходя из заданных двух монохроматических aberrаций, например, сферической aberrации  $\Delta s'$  и отступления от условия изопланатизма  $\eta$  (или комы), или  $\Delta s'$  и астигматизма  $Z'_m - Z'_{s_2}$  находят основные параметры  $P^*$  и  $W^*$ . Хроматический параметр  $C^*$  определяется самостоятельно. В большинстве случаев целесообразно принимать  $C^* = 0$ , поскольку при этом исправлен хроматизм положения как при  $s_1 = \infty$ , так и при  $s_1 \neq \infty$ .

В таком объективе при  $C^* = \text{const}$  параметры  $P^*$  и  $W^*$  связаны зависимостью:

$$P_0 = P^* - 0,85(W^* - 0,14)^2, \quad (4.5)$$

где  $P_0$  – минимальное значение параметра  $P^*$  в выбранной комбинации стекол. Коэффициент 0,14 в скобках в формуле (4.5) является средним значением для вариантов «крон впереди» (коэффициент 0,1) и «флинт впереди» (коэффициент равен 0,2). Таблицы комбинаций стекол, где параметр  $P_0$  представлен как функция параметра  $C^*$ , составлены Трубко [18]. Они позволяют выбрать комбинацию стекол по  $P_0$ , то есть по требуемым значениям  $P^*$  и  $W^*$  (4.5).

При пользовании таблицами [18] следует учитывать, что при  $W^* > 0$  необходимо пользоваться частью таблиц, названной «флинт впереди» (точнее «отрицательная линза впереди»), имея в виду, что приведенные марки стекол следует менять местами. Основным критерий для выбора, какая линза – положительная или отрицательная («крон» или «флинт») должна быть первой в объективе, – это получение минимальной кривизны склеиваемых поверхностей. Варианты систем с «отрицательной линзой впереди» зачастую сложнее изготовить, поэтому при  $0 < W^* < 0,8$  могут применяться как комбинации «флинт впереди», так и комбинации «крон впереди». Кроме того, следует помнить, что aberrации пятого порядка при примерно одинаковых значениях  $P_0$  могут существенно различаться. Поэтому не следует выбирать комбинацию стекол, соответствующую ближайшему значению  $P_0$ , а необходимо перебрать ряд комбинаций и найти обладающую минимальным значением сферической aberrации пятого порядка.

Расчет значений конструктивных параметров компонента можно выполнить с помощью требования 7 САРО, где по заданным  $P^*$  и  $W^*$ , маркам стекол и минимальным значениям толщин линз определяются радиусы поверхностей линз или углы первого параксиального луча  $\alpha_i$  (по желанию пользователя).

Для двухлинзового компонента характерно присутствие сферической aberrации пятого порядка и продольной сферохроматической aberrации второго порядка, особенно заметных при диафрагменных числах, меньших 4. При подборе стекол с помощью таблиц Г. Г. Слюсарева, составленных для длин волн  $F$  и  $C$ , или С. В. Трубко, составленных для  $F'$  и  $C'$ , следует выбрать несколько пар стекол с необходимым значением  $P_0$  (не обязательно точным), и выбрать то сочетание, которое дает меньшие значения сферической aberrации пятого порядка и сферохроматической aberrации. Как показало исследование вариантов склеенных объективов (см. табл. 4.1), разброс значений остаточной сферической aberrации при  $P \approx W \approx 0$  может быть довольно велик: сочетание баритового флинта с тяжелым флинтом (из баритового флинта выполняется положительная линза) превосходит по коррекции aberrаций комбинацию легкого флинта с

баритовым кроном практически в 3 раза. В таблице 4.1 приведены значения сферической aberrации пятого порядка  $\Delta s'_V$  и продольной сферохроматической aberrации  $\delta_{xp} = s'_1(2 - 1) - s'_0(2 - 1)$  в мм для объективов, выполненных с использованием различных марок стекол при  $f' = 100$  мм,  $K = 5$ .

Табл. 4.1 Остаточные aberrации объектива, склеенного из двух линз

Комбинация стекло	Показатели преломления	Число Аббе	$\delta_{xp}$ , мм	$\Delta s'_V$ , мм
БФ7/ТФ5	1,58 / 1,76	53,57 / 27,32	0,117	0,065
ТК23/БФ28	1,59 / 1,67	61,01 / 35,19	0,135	0,085
ТФ4/БФ13	1,75 / 1,64	27,94 / 47,99	0,154	0,105
ТК12/БФ24	1,57 / 1,64	62,71 / 36,50	0,145	0,098
ТФ3/БФ7	1,72 / 1,58	29,29 / 53,57	0,148	0,136
ЛК7/ТФ2	1,48 / 1,68	66,17 / 31,99	0,123	0,118
ТК23/БФ12	1,59 / 1,63	61,01 / 38,85	0,185	0,122
БК10/Ф9	1,57 / 1,62	55,76 / 34,33	0,194	0,122
ТФ2/БК6	1,68 / 1,54	32,0 / 59,42	0,153	0,174
ТФ1/К8	1,65 / 1,52	33,64 / 63,86	0,145	0,175
Ф6/БК8	1,61 / 1,55	37,69 / 62,56	0,199	0,224
Ф9/ЛК4	1,62 / 1,49	34,33 / 64,96	0,173	0,251
ЛФ5/БК8	1,58 / 1,55	41,05 / 62,56	0,274	0,304

Для компонента, склеенного из двух линз, характерно наличие неустранимых сферической aberrации пятого порядка и продольной сферохроматической aberrации второго порядка. Отступление от условия изопланатизма  $\eta$  зависит от апертуры практически по закону третьих порядков. Путем компьютерного моделирования была установлена зависимость остаточной поперечной сферической aberrации от диафрагменного числа  $K$  и фокусного расстояния при  $s_1 = \infty$  и значениях основных параметров  $P^* \approx 0$ ,  $W^* \approx 0$  [8]:

$$\Delta y' = (0,012 \div 0,036) f' K^{-5,23} \quad (4.2)$$

Диапазон коэффициента, находящегося в скобках в этой формуле, зависит от комбинации стекол. Наименьший коэффициент характерен для комбинаций БФ/ТФ, где из баритового флинта выполняется положительная линза. В соответствии с рекомендацией Г.Г.Слюсарева, при  $W^* \geq 0$  меньшие aberrации пятого порядка сопутствуют комбинации «флинт впереди», точнее «отрицательная линза впереди». Верхний предел в формуле (4.2) при  $W^* = 0$  относится именно к комбинации «флинт впереди».

Несколько округляя формулу (4.2) и используя значения, относящиеся к комбинациям «крон впереди», получаем формулу для величины  $\Delta P$ , то есть поправки для  $P^*$ , при которой для края апертуры происходит компенсация сферической aberrации пятого порядка:

$$\Delta P = 5/K^2 \quad (4.3)$$

Для компенсации сферохроматической аберрации аналогичная формула имеет вид:

$$\Delta C = -0,032/K^2 \quad (4.4)$$

В качестве примера рассмотрим расчет объектива бинокля 8 x 30 с фокусным расстоянием 122,8 мм и диаметром входного зрачка 30 мм. Объектив должен компенсировать сферическую аберрацию  $\Delta y'_1$ , отступление от условия изопланатизма  $\eta_1$  и хроматизм  $y'_1(F' - C')$  для крайнего луча (луча 1) с координатой на входном зрачке  $H_1 = D/2$ . Эти аберрации вычисляются в обратном ходе лучей через окуляр и призмennую систему. В рассматриваемом случае эти аберрации составляют:

1. Продольная сферическая аберрация:  $\overline{\Delta s'_{ок}} = 0,0882$ ,
2. Отступление от условия изопланатизма:  $\overline{\eta_{ок}} = -0,1\%$ ,
3. Продольный хроматизм  $\overline{s'(F' - C')_{ок}} = 0,25$ ,
4. Поперечная сферическая аберрация для луча  $\overline{\Delta y'_{ок}} = 0,0109$
5. Поперечный хроматизм для крайнего луча  $\Delta y'_1(F' - C') = 0,031$ ;

Продольные аберрации удобно использовать для определения основных параметров объектива  $P^*$ ,  $W^*$ ,  $C^*$ , а поперечные – для автоматизированной коррекции (требование 11 САРО).

Аберрации объектива для компенсации аберраций окуляра с призмой должны составлять:  $\Delta s'_1 = -\overline{\Delta s'_{ок}}$ ,  $\eta_1 = \overline{\eta_{ок}}$ ,  $(s'_{F'} - s'_{C'})_1 = -\overline{(s'_{F'} - s'_{C'})_{ок}}$

Найдем требуемые значения основных параметров:

$$P^* = -2 \cdot (-0,0882) \cdot 122,8/15^2 = 0,096$$

$$W^* = 2 \cdot (0,00104) \cdot (122,8/15)^2 = 0,139$$

$$C^* = -0,25/122,8 = -0,0020$$

Внесем поправки на эти параметры  $P^*$  и  $W^*$ , учитывая сферическую аберрацию пятого порядка

$$\Delta P^* = 5/K^2$$

и сферохроматизм второго порядка:

$$\Delta C^* = -0,032/K^2,$$

где  $K$  – диафрагменное число. Диафрагменное число в данном случае  $K = f'/D = 122,8/30 = 4,093$ .

В результате поправки  $\Delta P^* = 0,26$ ,  $\Delta C^* = -0,002$ . Поправка на основной параметр  $W^*$  не требуется, так как величина  $\eta$  практически следует закону третьего порядка. Окончательно:

$$P^* = 0,1 + 0,26 = 0,36,$$

$$C^* = -0,002 - 0,002 = -0,004,$$

$$P_0 = 0,36 - 0,85(W^* - 0,14)^2 = 0,36.$$

Воспользовавшись таблицами [18], находим несколько пар стекол с требуемыми значениями параметров  $P^*$  и  $C^*$ : БФ13/ТФ3, БФ13/ТФ2,

ЛК4/БФ4, БФ11/БФ28, БФ7/ТФ2. Выполним автоматизированную коррекцию по требованию 11 (САРО) для всех комбинаций стекол, задав в качестве корригируемых функций поперечную сферическую aberrацию  $\Delta y'_1 = -0,0109$  и величину  $\eta_1 = -0,00104$ , а в качестве коррекционных параметров - углы первого параксиального луча с осью, равные в исходной системе  $\alpha_2 = 0,5$ ,  $\alpha_3 = 0,3$ .

Наилучшей комбинацией является БФ7/ТФ2, у которой  $\Delta y'_1 = -0,0109$ ,  $\eta_1 = -0,1\%$ ,  $\Delta y'_3 = -0,0075$ ,  $\Delta y'_1(F' - C') = -0,0322$ .

Нетрудно найти угловые aberrации за окуляром, имеющим фокусное расстояние  $f'_{\text{ок}} = 15,6$  мм:  $\sum \Delta y_1 = -0,0107 + 0,0109 = 0,0002$ , тогда поперечная aberrация в угловой мере за окуляром  $\sigma'_1 = 0,0002/15,6 = 0,00001228$  или в секундах  $\sigma'_1 = 2,6''$ ; на зоне  $\sum \Delta y_3 = -0,0075 + 0,0038 = -0,0037$ ; за окуляром  $\sigma'_3 = 0,0037/15,6 = 0,000237$  или  $\sigma'_3 = 47''$ ; неизопланатизм  $\eta_1 = -0,1 + 0,104 = 0,004\%$ , хроматизм  $(\sigma'_{F'} - \sigma'_{C'}) = (-0,0325 + 0,0309)/(15,6 \cdot 0,000005) = 20,5''$ .

На завершающем этапе расчета следует осуществить оптимальную коррекцию сферической aberrации во всей системе в целом (см. например, лабораторную работу 2.10 «Модернизация оптической системы бинокля 8 x 30» в [7] или раздел «Оптимальная коррекция aberrаций зрительных труб» настоящего учебного пособия). В качестве параметров необходимо выбрать радиусы  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  и положение плоскости наилучшей установки. Для оптической системы зрительной трубы это фокусировка окуляра за счет изменения расстояния  $d_5$ . Как было показано в [7], при оптимальной коррекции максимальное значение поперечной aberrации (или угловой) уменьшается примерно в три раза по сравнению с поперечной aberrацией на зоне  $\sigma'_3$  при  $\sigma'_1 = 0$ . В рассматриваемом случае сферическая aberrация за окуляром составит примерно  $\sigma'_{\text{max}} \approx 14''$  при допустимой величине  $30''$ . Хроматическая aberrация при допустимой величине  $\sigma'_{F'} - \sigma'_{C'} = 5'$  составляет примерно  $26''$ , величина  $\eta$  практически равна нулю.

В таблице 4.2 приведены значения конструктивных параметров оптической системы монокуляра бинокля 8 x 30, полученные в результате расчета объектива, как описано выше, и перехода к радиусам стандартного ряда.

Табл. 4.2 Конструктивные параметры оптической системы монокуляра бинокля

Радиусы	Толщины	Марки стекол
75,16	6,0	1
-56,75	2,8	БФ7
-324,3	39,7	ТФ2
0	83	1
0	30,89	БК10
-38,04	1,5	1
22,01	8,5	Ф2
-22,01	0,5	К8
37,44	5,5	1
-37,44	0,55	К8
19,31	7,5	1
-22,01	1,5	К8
-104,81		Ф2
		1

В таблице 4.3 приведены aberrации осевого пучка рассчитанной оптической системы, после перехода к радиусам стандартного ряда.

Табл. 4.3 Aberrации осевого пучка оптической системы монокуляра

H, мм	$\sigma'(0)$	$\eta, \%$	$\sigma'(1)$	$\eta(1), \%$	$\sigma'(2)$	$\eta(2), \%$
15,0	15''	0,818 – 3	2'17''	0,00886	1'16''	-0,0147
14,0	-6,7''	0,00362	2'06''	0,00985	28,6''	-0,0097
13,0	-16,9''	0,00549	2'02''	0,00997	-4,2''	-0,0058
11,9	-17,9''	0,00648	2'04''	0,00927	-23,8''	-0,0028
10,6	-12,0''	0,00666	2'07''	0,00780	-32,5''	-0,75–3
9,19	-2,0''	0,00605	2'09''	0,00561	-32,4''	0,516–3
7,5	9,2''	0,00472	2'04''	0,00273	-25,6''	0,988–3
5,3	16,8''	0,00269	1'44''	-0,79–3	-14,7''	0,712–3
0	0	0	0	0	0	0

В качестве еще одного примера выполним расчет оборачивающей системы зрительной трубы, работающей с увеличением  $V = -1$ , состоящей из двух одинаковых двухлинзовых компонентов с воздушным промежутком, симметрично расположенных относительно промежуточного изображения апертурной диафрагмы. При этом появляется возможность воздействовать на астигматизм, то есть выполнить коррекцию  $Z'_m = Z'_s$  или  $Z'_m = -Z'_s$  (см. формулы (2.9) – (2.11)). Целесообразно принять  $P^* = C^* = 0$ , то есть исправить сферическую aberrацию и хроматизм положения, что представляет собой определенные технологические преимущества. Произведем расчет при следующих габаритных условиях:  $f'_1 = f'_2 = 100$  мм, расстояние между компонентами  $d = 50$  мм, диаметр зрачка  $D = 20$  мм, линейное поле  $2y = 20$  мм.

Выполним сначала расчет второй половины при  $t = -d/(2f') = -25/100 = 0,25$ . Осуществим коррекцию  $Z'_m = Z'_s$ . На основании формулы (2.13) при  $S_{III} = 0$  и  $P = 0$  находим, что  $W = 2$ . В соответствии с рекомендацией Г.Г. Слюсарева [11] при  $W \geq 0$  следует использовать комбинацию «флинт впереди» (точнее, отрицательная линза впереди). При расчете в программном комплексе САРО необходимо положение зрачка, а именно  $HV = -25$ ,  $B0 = 1$ , а также световой диаметр  $СВД = D - HV \cdot y/f' + 2 = 27$  мм, где 2 – припуск на крепление.

Выберем комбинацию стекол произвольно, например, ТФ2 – К8. Осуществляем коррекцию монохроматических aberrаций, то есть поперечной сферической aberrации на краю зрачка  $\overline{\Delta y}'_1 = 0 \pm 0,001$ ,  $\overline{Z'_m - Z'_s} = 0 \pm 0,01$ . Исходную систему задаем углами первого параксиального луча с осью:  $\alpha_2 = 0,5$ ,  $\alpha_3 = 0,3$ , их же и используем в качестве коррекционных параметров.

Получаем, неизопланатизм на краю зрачка  $\eta_1 = 0,872\%$ , на зоне зрачка  $\eta_3 = 0,417\%$ , продольная сферическая aberrация на краю зрачка  $\Delta s'_1 = 0$ , для третьего луча  $\Delta s'_3 = -0,0381$ , откуда продольная сферическая aberrация третьего порядка

$$\Delta s'_{III} = 4\Delta s'_3 - \Delta s'_1 = -0,1524,$$

чему соответствует значение параметра

$$P^* = -2\Delta s'_{III} \cdot m^2 / f' = 0,3.$$

Отступление от условия изопланатизма третьего порядка

$$\eta_{III} = 4\eta_3 - \eta_1 = 0,796\%,$$

тогда параметр

$$W^* = 2\eta_{III} \cdot (f'/m)^2 = 1,59.$$

Вычислим параметр  $P_0 = P^* - 0,85(W^* - 0,14)^2 = -1,5$ . Вычислим поправку для сферохроматической aberrации:

$$\Delta C = -0,032/K^2 = -0,0013.$$

Из таблиц Трубка [18] путем подбора марок стекол и повторной коррекции выбираем комбинацию стекол, обеспечивающую наименьшее значение хроматизма положения в поперечной мере. Для приведенных данных такой комбинацией будет ТФ3 – БФ25,  $\Delta y'_1(2-1) = 0,005$ .

Если достигнутое значение не устраивает разработчика оптической системы, то можно осуществить коррекцию хроматизма и сферической aberrации, предполагая, что астигматизм изменится несущественно. В рассматриваемом примере при коррекции сферической aberrации на краю зрачка и хроматизма положения получим астигматизм для края поля примерно 0,05.

Составим оборачивающую систему, для чего перейдем от углов первого параксиального луча к радиусам и сохраним систему. Осуществим оборачивание системы (инверсию), то есть получим первую половину системы. Предмет должен быть расположен на конечном расстоянии, в

данном случае  $-96,968$ . Укажем величину предмета  $Y = -10$ , и величину апертуры  $\sin \sigma = MUMAX = 0,1$ . К полученной системе присоединяем вторую половину. Расстояние между компонентами укажем 50 мм, апертурная диафрагма расположена посередине между компонентами, то есть после третьей поверхности на расстоянии 25 мм. Выполнив контрольный расчет хода лучей, убеждаемся, что увеличение равно  $V = -1$ . Осуществим оптимальную коррекцию сферической аберрации, а также коррекцию хроматизма, дополнив список корригируемых функций линейным увеличением  $V = -1$ . В качестве коррекционных параметров следует использовать радиусы и смещение плоскости установки. При этом необходимо установить связи между параметрами для сохранения симметрии системы:  $\Delta r_1 = -\Delta r_6$ ,  $\Delta r_2 = -\Delta r_5$ ,  $\Delta r_3 = -\Delta r_4$ , то есть в программе поддерживаются связи между изменениями параметров.

Полученные конструктивные параметры системы приведены в таблице. Линейное увеличение  $V = -1$ , числовая апертура 0,1, линейное поле в пространстве предметов 20 мм.

Табл.4.4 Конструктивные параметры симметричной линзовой оборачивающей системы

Радиусы	Толщины	Марки стекол
112,98	5	1
-28,25	3	БФ25
-83,37	50	ТФ3
83,37	3	1
28,25	5	ТФ3
-112,98		БФ25
		1

Табл. 4.5 Аберрации осевого пучка симметричной линзовой оборачивающей системы

H, мм	$\Delta s'(0)$	$\Delta y'(0)$	$\eta, \%$	$\Delta y'(2-1)$	$\Delta s'(1)$	$\Delta s'(2)$
13,8	0,0149	0,0015	-0,37 - 4	-0,00132	0,135	0,122
12,0	-0,0146	-0,0013	-0,14 - 4	-0,00789	0,141	0,050
9,77	-0,0077	-0,55 - 3	0,583 - 5	-0,0116	0,180	0,017
6,91	0,0319	0,0016	0,567 - 5	-0,0116	0,25	0,0193
0	0,101	0	0	0	0,348	0,053

Табл. 4.6 Аберрации бесконечно тонких астигматических пучков симметричной линзовой оборачивающей системы

l, мм	$Z'_m$	$Z'_s$	$Z'_m - Z'_s$
-10,0	-0,72	-0,639	-0,0802
-7,07	-0,322	-0,273	-0,0493

Рассмотрим пример расчета оборачивающей системы в виде одиночного компонента, склеенного из двух линз и работающего с линейным увеличением  $V = -1$ , числовая апертура  $A = 0,06$ , зрачок совпадает с компонентом. Расстояние между предметом и изображением  $L = 200$ .

Найдем фокусное расстояние и передний отрезок по формулам:

$$f' = -L \frac{V}{(V-1)^2},$$

$$s_1 = \frac{L}{V-1},$$

откуда  $f' = 50$ ,  $s_1 = -100$ . Диаметр зрачка  $D = -2 \cdot s_1 \cdot A = 12$  мм.

Следует исправить aberrации точки на оси, включая хроматизм, то есть  $P = W = C = 0$ .

Преобразуя формулы связи  $P^*$  и  $W^*$  с параметрами  $P$  и  $W$  [2], характеризующими сферическую aberrацию и отступление от условия изопланатизма, когда предмет расположен на конечном расстоянии, а также полагая  $P = W = 0$ , можно получить следующие выражения:

$$P^* = \frac{V}{(1-V)^2} [2V(2+\pi) + 1], \quad (4.5)$$

$$W^* = \frac{V}{V-1} (2+\pi), \quad (4.6)$$

где параметр  $\pi \approx 0,7$ .

Тогда найдем  $P^* = 1,1$ ,  $W^* = 1,35$ ,  $C = 0$ . Отсюда следует, что  $P_0 = -0,14 \approx 0$ . Подберем с помощью таблиц [18] комбинацию стекол с  $P_0 \approx 0$ ,  $C = 0$ . Поскольку  $W^* \geq 0$ , следует использовать комбинацию «флинт впереди» (первой должна быть отрицательная линза). Используем комбинации стекол БФ24/ЛК3 ( $P_0 = -0,17$ ), ТФ7/БФ1 ( $P_0 = -0,12$ ). Расчет выполним по требованию 7 программы САРО при  $A_0 = 0$ ,  $HA = 50$ ,  $HMAX = 6$ . Определяем систему через радиусы поверхностей  $r_i$  и переходим к заданию предмета на конечном расстоянии  $A_0 = 1$ ,  $HA = -f' + s_F$ . Величина предмета  $Y_{MAX} = -10$ . Перейдем от радиусов к углам первого параксиального луча  $\alpha_i$  и осуществим оптимальную коррекцию сферической aberrации и отступления от условия изопланатизма с помощью параметров  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  и смещения плоскости установки  $DS'Y$ . Повторив расчет для выбранных комбинаций стекол, выберем вариант с  $s'(F'-C)_1$ , наиболее близким к нулю. Соответствующая пара стекол БФ24/ЛК3.

В таблице 4.7 приведены конструктивные параметры рассчитанного компонента, полученные после перехода к радиусам стандартного ряда, а в табл. 4.8 – 4.9 – aberrации системы.

Табл.4.7 Конструктивные параметры оборачивающей системы в виде одиночного склеенного компонента

Радиусы	Толщины	Марки стекол
29,99	2	1
-15,276	5,5	БФ24
-55,46		ЛКЗ
		1

Табл. 4.8 Аберрации осевого пучка одиночного склеенного компонента при  $V = -1$

H, мм	$\Delta s'(0)$	$\Delta y'(0)$	$\eta, \%$	$\Delta y'(2-1)$	$\Delta s'(1)$	$\Delta s'(2)$
6,0	0,0699	0,00425	0,884 - 3	-0,0016	0,184	0,158
5,2	-0,0132	-0,69 - 3	-0,0101	-0,00597	0,141	0,0274
4,24	-0,0173	-0,74 - 3	-0,0134	-0,00834	0,173	-0,0206
3,0	0,0477	0,00145	-0,0099	-0,00816	0,273	0,00363
0	0,174	0	0	0	0,431	0,092

Табл. 4.9 Аберрации бесконечно тонких астигматических пучков одиночного склеенного компонента  $V = -1$

l, мм	$Z'_m$	$Z'_s$	$Z'_m - Z'_s$
-10,0	-3,06	-1,41	-1,65
-7,07	-1,47	-0,627	-0,844

Напомним, что астигматизм в такой системе не поддается коррекции.

## 4.2 Оптимальная коррекция поперечной сферической аберрации зрительных труб

Если компонент, склеенный из двух линз, является составной частью зрительной трубы, то есть объективом или элементом оборачивающей системы, то важнейшим критерием качества осевой точки изображения является поперечная сферическая аберрация, которая за окуляром превращается в угловую аберрацию  $\sigma'$ .

Традиционный способ коррекции сферической аберрации заключается в устранении ее на краю отверстия при  $H = H_1$ , то есть  $\sigma'_1 = 0$ . Допустимое значение угловой аберрации в зрительных трубах при  $\sigma'_1 = 0$  принималось равным  $\sigma'_3 \leq 1'$ . При детальном изучении было установлено, что максимальное значение поперечной и, соответственно, угловой аберрации имеет место не на «зоне» отверстия, то есть для луча 3, а для луча с координатой на зрачке  $H_{\max} = H\sqrt{0.6}$ , или практически для луча 22 ( $H_{22} = H\sqrt{5/8}$ ), а значения  $\sigma'_{22}$  и  $\sigma'_{\max}$  (соответственно  $\Delta y'_{22}$  и  $\Delta y'_{\max}$ ) совпадают с точностью до трех значащих цифр.

В визуальных приборах, в частности, зрительных трубах, за счет аккомодации глаза или перефокусировки окуляра происходит автоматическое введение плоскости наилучшей установки. При

осуществлении коррекции  $\sigma'_1 = 0$  и наличии неустраняемой сферической aberrации пятого порядка плоскость наилучшей установки, соответствующая минимуму поперечной aberrации, достигается при выполнении условия  $\sigma'_1 = -\sigma'_{22}$ , при этом максимальное значение  $\sigma'_{\max}$  составляет  $\sigma'_{\max} = 0,56 \sigma'_3$  (или для поперечной сферической aberrации  $\Delta y'_{\max} = 0,56 \Delta y'_3$ ).

Показано [7], что дальнейшее уменьшение значения поперечной сферической aberrации перед окуляром  $\Delta y'_{\max}$  (или соответствующей угловой сферической aberrации  $\sigma'_{\max}$  за окуляром) достигается при одновременном введении смещения плоскости установки DS'Y и изменении aberrации третьего порядка, так чтобы  $\Delta y'_1 = -\Delta y'_{22}$  и  $\Delta y'_1 = \Delta y'_{24}$ , где  $\Delta y'_{24}$  – величина поперечной aberrации для 24 луча, то есть луча с высотой на зрачке  $H = \sqrt{1/8} H_{\max}$ . График зависимости поперечной сферической aberrации  $\Delta y'$  от координаты на зрачке  $H$  для такого случая коррекции представлен на рис.4.2. Максимальное значение поперечной сферической aberrации достигает  $\Delta y'_1 = \Delta y'_{24} = -\Delta y'_{22} = 0,31 \Delta y'_{\max}$ . В дальнейшем будем обозначать такое исправление как «оптимальная коррекция сферической aberrации».

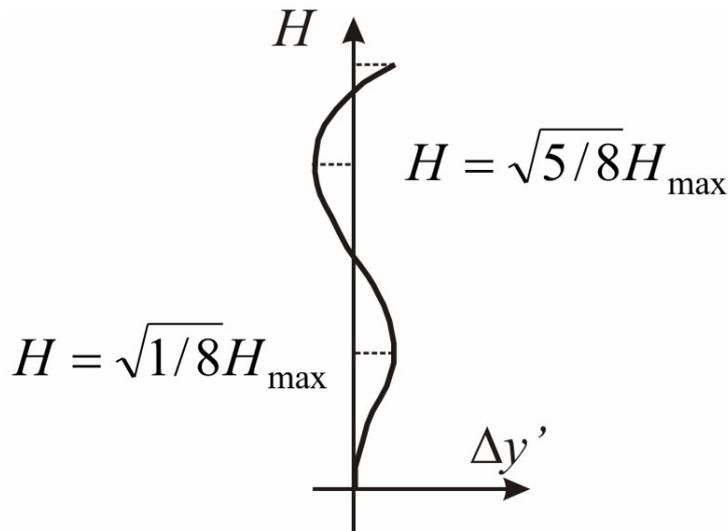


Рис.4.2 Вид графика поперечной сферической aberrации при оптимальной коррекции в случае наличия aberrации третьего и пятого порядков

В статье [8] показано, что оптимальная коррекция поперечной сферической aberrации в оптической системе зрительной трубы достигается при условии  $\sigma'_1 = -\sigma'_{22} = \sigma'_{24}$  и использовании в качестве коррекционных параметров  $\alpha_2, \alpha_3$  объектива, склеенного из двух линз и смещения плоскости установки, что для телескопической системы равносильно использованию в качестве коррекционного параметра воздушного промежутка  $d$ , предшествующего окуляру.

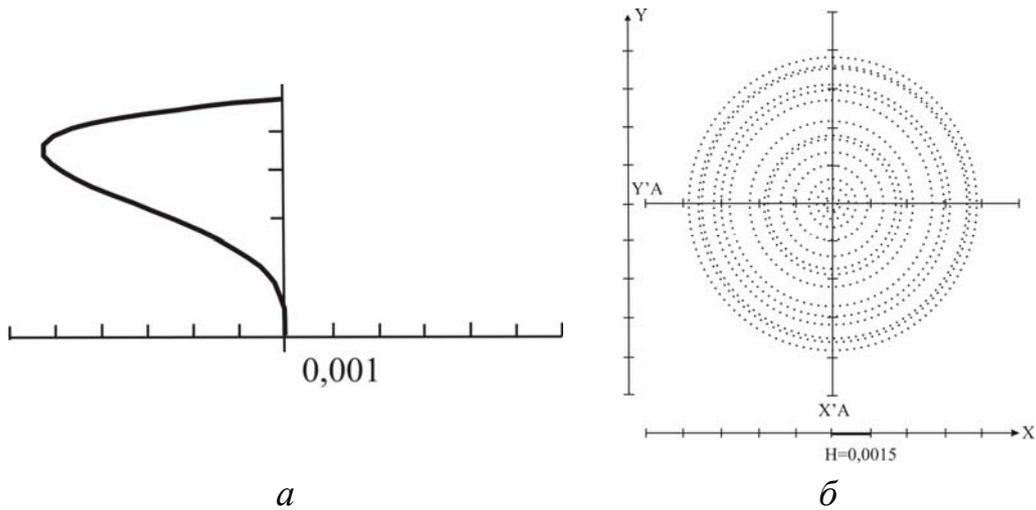


Рис. 4.3 Графики поперечной сферической aberrации (а) и вид пятна рассеяния (б) при коррекции поперечной сферической aberrации на краю зрачка  $\Delta y'_1 = 0$

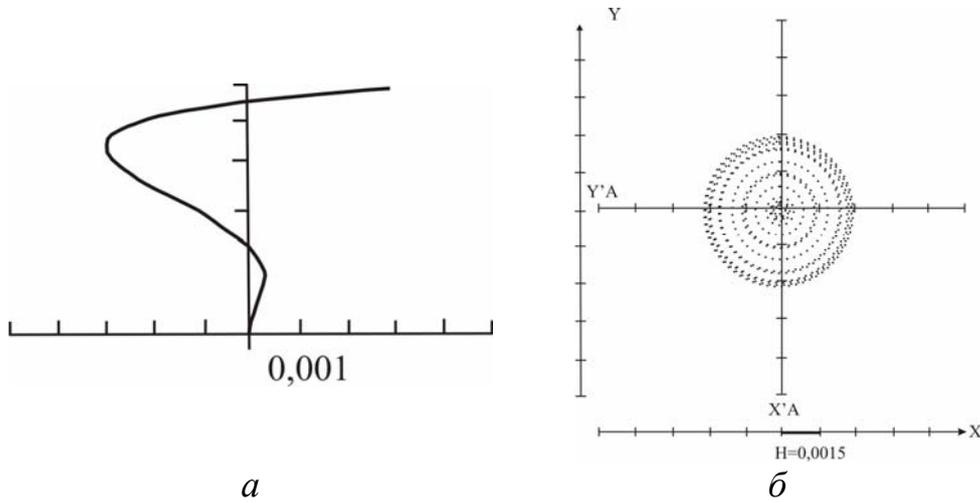


Рис. 4.4 Графики поперечной сферической aberrации (а) и вид пятна рассеяния (б) при коррекции  $\Delta y'_1 = -\Delta y'_3$

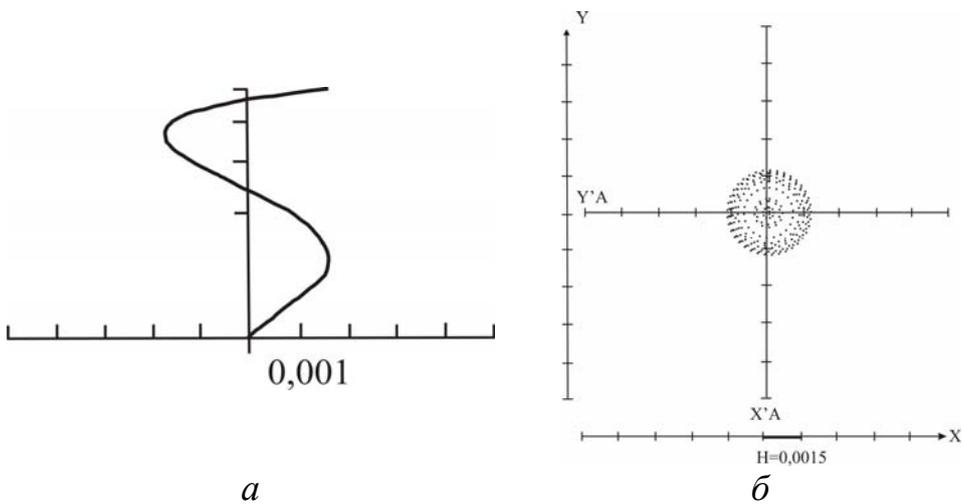


Рис. 4.5 Графики поперечной сферической aberrации (а) и вид пятна рассеяния (б) при оптимальной коррекции  $\Delta y'_1 = -\Delta y'_{22} = \Delta y'_{24}$

На рис. 4.3 – 4.5 показаны графики поперечной сферической aberrации и соответствующие пятна рассеяния для трех возможных случаев коррекции сферической aberrации в склеенном объективе перед окуляром. Расчеты выполнены для одной и той же системы. В этих случаях графики aberrаций и структура пятна рассеяния имеют различный вид. Из рисунков 4.3 – 4.5 видна (с учетом масштаба графиков, отображаемых под осями) разница в величине остаточной сферической aberrации, и соответственно, в величине угловой сферической aberrации за окуляром при использовании этих способов коррекции.

### 4.3 Абберационные свойства и расчёт объектива, склеенного из трёх линз.

Объектив этого типа (рис. 4.6), используемый как компонент зрительных труб, не нашёл практического применения, поскольку не имеет преимуществ по сравнению с объективом, склеенным из двух линз, как в отношении сферической aberrации пятого порядка, так и в отношении сферохроматической aberrации. Единственным преимуществом является возможность получения заданных значений основных параметров  $P^*$ ,  $W^*$ ,  $C^*$  практически при любой комбинации марок стёкол. Такой расчёт может быть выполнен с помощью требования 7 SAPO.

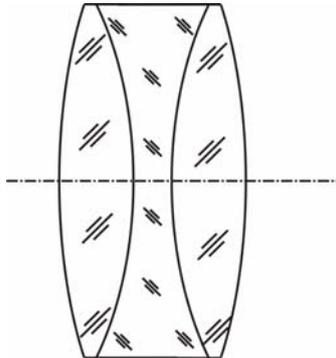


Рис. 4.6. Объектив, склеенный из трех линз

Объективы рассматриваемого типа встречаются в объективах-апохроматах микроскопа, а также в окулярах телескопических систем.

Покажем на примере расчёта апохроматического объектива коллиматора с  $f' = 500$  мм,  $D = 80$  мм возможность использования компонента из трёх склеенных линз.

В работе [19] было показано, что оптимальным сочетанием пары стёкол, обеспечивающих оптимальную коррекцию вторичного спектра в области длин волн от  $F'$  до  $C'$  при исправленном хроматизме положения, являются ОК4/К8.

Для проверки возможности использования склейки из двух линз марок стёкол ОК4/К8 и К8/ОК4 в качестве объектива коллиматора определим величины  $P_0$  при  $C=0$  для этих пар.

С этой целью выполним коррекцию хроматизма положения  $s'_0(F'-C')$  одновременно с коррекцией комы третьего порядка, что обеспечит получение практически  $P_0 = P^* - 0,85(W^* - 0,14)^2 \approx P + 0,02$ . В результате получаем для комбинации ОК4/К8  $P_0 \approx 12,4$ , а для К8/ОК4  $P_0 \approx 8,2$ . Следовательно, использование компонента в виде склейки из двух линз в данном случае невозможно.

Выполним расчёт для трёх склеенных линз ОК4/К8/ОК4. Объектив коллиматора должен иметь дифракционное качество изображения, следовательно, при автоматизированной коррекции следует использовать волновые aberrации. Первоначально выполним расчёт по требованию 7 САРО, а затем по требованию 11, используя в качестве коррекционных параметров  $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  и смещение плоскости установки  $DS'Y$ , а в качестве корригируемых функций волновые aberrации  $w(e)_1 = 0$ ,  $w(e)_3 = 0$ ,  $\eta_1 = 0$  и разности  $w(F')_1 - w(C')_1 = 0$ ,  $w(F')_3 = w(C')_3$ . Получаем следующую систему:

$\alpha$	$d$ , мм	Материал
0		1
0,82798	11,7	ОК4
0,815489	20	К8
0,611643	18,2	ОК4
1		1

Числа Штреля  $S$  составляют  $S(e) = 0,89$ ;  $S(C') = 0,82$ ;  $S(F') = 0,90$ . Допустимое значение  $S$  при качестве изображения, ограничиваемом дифракцией,  $S \geq 0,8$ . Следовательно, получен результат, превышающий требуемый уровень.

Однако склеивать линзы диаметром 80 мм не рекомендуется, особенно это относится к материалам с большой разностью коэффициента линейного расширения. Так, например, линзы объективов микроскопа с диаметрами порядка 12 мм, выполненные из флюорита и особого флинта, успешно работают в лабораторных условиях, где колебания температуры составляют единицы градусов. Линзы объективов коллиматоров с диаметрами около 100 мм и более, даже выполненные из обычных стёкол, не склеиваются, а реализуются с малым воздушным промежутком, равным 0,03мм, что обеспечивается с помощью прокладок из фольги. В рассматриваемом случае разность коэффициентов линейного расширения линз чрезвычайно велика. Поэтому необходимо ввести воздушные промежутки между первой и второй и второй и третьей линзами, равные 0,03мм. При этом между радиусами  $r_2, r_3$  и  $r_4, r_5$  по технологическим соображениям целесообразно сохранить равенства  $r_2 = r_3$  и  $r_4 = r_5$ . При этом качество изображения (числа Штреля) несколько ухудшается. Выполним коррекцию aberrаций, используя в качестве коррекционных параметров радиусы поверхностей и смещение плоскости установки, с прежними

корректируемыми функциями, добавив  $f'=500\pm 0,01$ . Итак, коррекционными параметрами будут радиусы  $r_1, r_6, r_2=r_3, r_4=r_5$ , смещение плоскости установки  $DS'Y$ . В результате получаем систему с лучшими, чем ранее числами Штреля  $S(e) = 0,96; S(C') = 0,97; S(F') = 0,93$ . Увеличим диаметр входного зрачка до 85мм. После автоматизированной коррекции с прежними условиями получаем  $S(e) = 0,80; S(C') = 0,70; S(F') = 0,82$ . В таблице 4.10 приведены конструктивные параметры рассчитанной системы, полученные после перехода к радиусам стандартного ряда. На рис. 4.7 приведены графики волновой сферической аберрации.

Табл.4.10 Конструктивные параметры системы из трех несклеенных линз

Радиусы	Толщины	Марки стекол
189,23	13,7	1
926,8	0,03	OK4
926,8	20	1
94,41	0,03	K8
94,41	20,2	1
-1652		OK4
		1

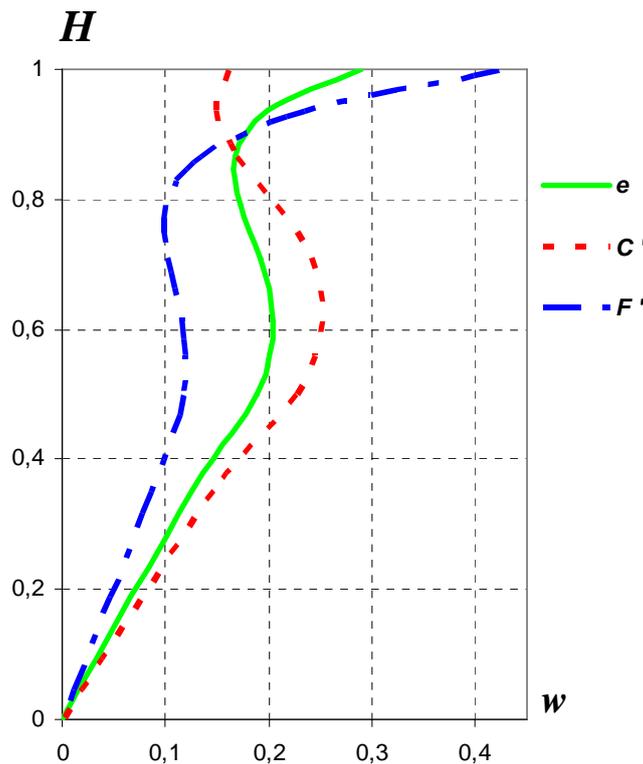


Рис. 4.7 Графики волновой аберрации для системы из трех несклеенных линз

#### 4.4 Расчет и абберационные свойства трехлинзового объектива, из которых две – склеенные

Объективы, изображенные на рис. 4.4, по сравнению с объективами, склеенными из двух линз, обладают существенно меньшими сферической абберацией пятого порядка и сферохроматической абберацией, что позволяет использовать их при диафрагменных числах до  $K = 2$  [17].

Для предварительного расчета таких объективов при любом чередовании положительных и отрицательных линз в области аббераций третьего порядка с помощью основных параметров Г.Г.Слюсарева  $P^*$ ,  $W^*$ ,  $C^*$  можно использовать требование 7 программного комплекса САРО. В этом случае число коррекционных параметров (углы первого параксиального луча с осью  $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ ) превышает число корригируемых функций. В программе предусмотрены два варианта расчета. В первом случае пользователь задает  $\alpha_{\text{возд}}$ , то есть  $\alpha_3$  (для систем рис. 4.8а,б) или  $\alpha_4$  (для систем рис. 4.8в,г). Опыт показывает, что целесообразно задать  $\alpha_{\text{возд}} = 0,5$ , то есть равенство фокусных расстояний компонентов. Во втором варианте программа выдает диапазон  $\alpha_{\text{возд}}$ , при которых существуют решения.

Наименьшими значениями аббераций высших порядков обладают комбинации марок СТК, БФ и ТФ.

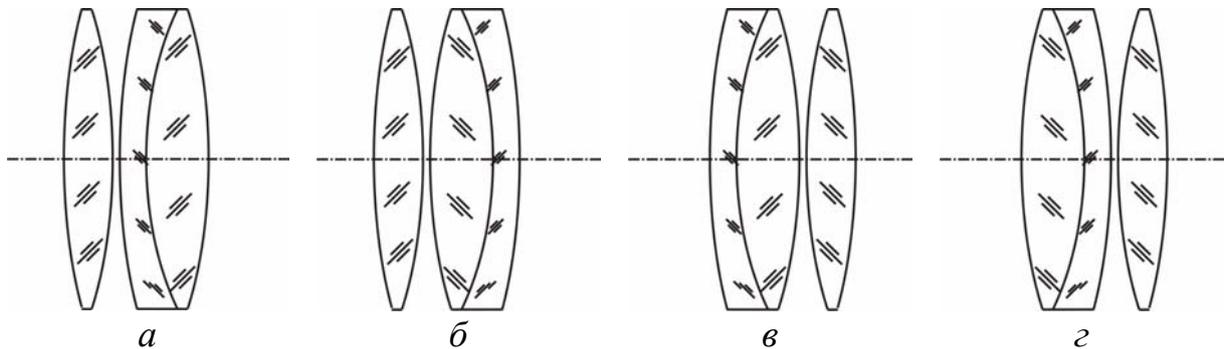


Рис. 4.8 Трехлинзовые объективы: склеенный объектив с линзой

Рассмотрим пример расчета объектива с  $f' = 100$ ,  $K=2$  для видимого диапазона длин волн  $e$ ,  $C'$ ,  $F'$ . Используем комбинацию стекол – линза из СТК19 и склеенный компонент из марок БФ13/ТФ10. Исходную оптическую систему получаем с помощью требования 7. Опыт показывает, что минимальные абберации имеют место при  $\alpha_{\text{возд}} = 0,5$ . Основные параметры  $P^* = W^* = C^* = 0$ . Затем осуществляем коррекцию геометрических аббераций, используя прием оптимальной коррекции поперечной сферической абберации:  $\Delta y'_{12} = -\Delta y'_{22}$ ; ( $\Delta y'_{12} + \Delta y'_{22} = 0$ );  $\Delta y'_{14} = \Delta y'_{24}$ ; ( $\Delta y'_{14} - \Delta y'_{24} = 0$ ). В число коррекционных функций также входит отступление от условия изопланатизма для края зрачка  $\eta_1 = 0$ , а также хроматизм  $\Delta y'_{1(2-1)} = \Delta y'_{1(F'-C')} = 0$ . Коррекционными параметрами являются углы первого параксиального луча с осью  $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$  и смещение плоскости наилучшей установки  $DS'Y$ . В результате после

выполнения автоматизированной коррекции (требование 11 САРО) получаем:  $\Delta y'_{11} = -\Delta y'_{22} = \Delta y'_{24} = 0,00137$ ,  $\Delta y'_{11}(F'-C') = 0$ ,  $s'_{0}(F'-C') = -0,121$ . Следовательно, сферохроматическая продольная aberrация  $\delta_{xp} = 0,121$ .

В таблице 4.11 представлены конструктивные параметры оптической системы из одиночной линзы и склеенного компонента, полученные при переходе к радиусам стандартного ряда, в табл. 4.12 – aberrации осевого пучка в плоскости установки, смещенной относительно гауссовой на величину  $DS'Y = -0,027$ .

Табл. 4.11. Конструктивные параметры оптической системы

Радиусы	Толщины	Марки стекол
206,1	10	1
-72,28	4	БФ13
-656,1	1	ТФ10
76,91	6,3	1
459,2		СТК19
		1

Табл. 4.12 Aberrации осевого пучка оптической системы  $f' = 100$ ,  $K = 2$  при  $DS'Y = -0,027$

H, мм	$\Delta y'(0)$	$\eta$ , %	$\Delta y'(2-1)$
25	0,00132	0,00221	-0,56-3
21,7	-0,0011	0,0317	-0,00721
17,7	-0,67-3	0,0396	-0,0113
12,5	0,00102	0,0283	-0,0117
0	0	0	0

#### 4.5 Aberrационные свойства и расчет объектива из двух линз с малым воздушным промежутком

В объективе такого типа по сравнению с объективом, склеенным из двух линз, прежде всего появляется дополнительный третий параметр  $\alpha_3$  между линзами. Это позволяет при любой комбинации стекол и  $\nu_2 \neq \nu_4$  получить любые значения основных параметров  $P^*$ ,  $W^*$ ,  $C^*$ . Кроме того, величина воздушного промежутка является параметром, который позволяет устранить сферическую aberrацию пятого порядка.

Как будет показано на примере расчета, такой компонент обладает уменьшенной сферохроматической aberrацией по сравнению с объективом, склеенным из двух линз. Анализ различных сочетаний стекол показал, что комбинация стекол из группы БФ (для положительной линзы)

и ТФ (для отрицательной линзы) является оптимальным в отношении сферической аберрации седьмого порядка. Недостатком является нетехнологичность компонента, в первую очередь за счет жестких требований к центрировке линз.

Приведем рекомендуемый порядок расчета для объектива такого типа. В выбранной комбинации марок стекол осуществляем расчет по требованию 7 программного комплекса САРО, полагая  $P^* = W^* = C^* = 0$ . Рационально выполнить расчет как с расположением линз «крон впереди», так и «флинт впереди», и выбрать вариант с наименьшими остаточными аберрациями.

На следующем этапе осуществляем автоматизированную коррекцию (требование 11 САРО), используя в качестве коррекционных параметров углы первого параксиального луча  $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  и воздушный промежуток между линзами  $d_2$ . В качестве корригируемых функций следует использовать  $\Delta y'_1, \Delta y'_3, \eta_1$  и  $\Delta y'_1(2-1)$ . В случае неудачи, например, если в результате коррекции  $d_2 < 0$ , рекомендуется взять другую комбинацию стекол.

В качестве примера выполним расчет объектива бинокля 8 x 30. Данные для расчета объектива приведены в разделе 4.1. Требуемые значения аберраций объектива, компенсирующие сферическую аберрацию, хроматизм положения и отступление от условия изопланатизма окуляра с призмой, составляют  $\Delta y'_1 = -0,0109$ ,  $\eta_1 = 0,00104$ ,  $\Delta y'_3 = -0,0038$ ,  $\Delta y'_1(F'-C') = -0,031$ . Этому соответствуют основные параметры  $P^* = 0,096$ ,  $W^* = -0,0139$ ,  $C^* = -0,002$ . Выбрав стекла БФ7 – ТФ8 и используя требование 7 программы САРО, получаем два решения: решение 1  $\Delta s'_1 = -2,55$ , решение 2  $\Delta s'_1 = -0,114$ .

Выбираем решение 2, округляем толщины линз и выполняем автоматизированную коррекцию, используя в качестве коррекционных параметров  $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  и  $d_2$ , округляем  $d_2$ . Присоединив призму с окуляром, то есть составив систему бинокля целиком, и выполнив оптимальную коррекцию (см. раздел 4.3) получаем пятно рассеяния для линии  $e \ 2\sigma' = 5,5''$ ,  $\eta_1 \approx 0$ ,  $\sigma'_1(F') \approx \sigma'_1(C') = 1'40''$ . В таблице 4.13 представлены конструктивные параметры системы, полученные после перехода к радиусам стандартного ряда, а в таблице 4.14 – аберрации осевого пучка системы.

Табл. 4. 13 Конструктивные параметры оптической системы монокуляра бинокля

Радиусы	Толщины	Марки стекол
67,45	6,3	1
-60,53	1,3	БФ7
-57,68	3	1
-418,8	39,7	ТФ8
0	83	1
0	27,385	БК10
-38,04	1,5	1
22,01	8,5	Ф2
-22,01	0,5	К8
37,44	5,5	1
-37,44	0,55	К8
19,31	7,5	1
-22,01	1,5	К8
-104,81		Ф2
		1

Табл. 4.14 Аберрации осевого пучка оптической системы монокуляра с объективом из двух несклеенных линз

H, мм	$\sigma'(0)$	$\eta, \%$	$\sigma'(1)$	$\sigma'(2)$
15,0	5,3''	-0,57-3	1'41''	1'44''
14,0	3,0''	-0,0038	1'45''	1'20''
13,0	-0,4''	-0,0056	1'46''	56,9''
11,9	-3,3''	-0,0064	1'44''	35,7''
10,6	-4,8''	-0,0062	1'41''	18,1''
9,19	-4,5''	-0,0054	1'35''	5,1''
7,5	-2,6''	-0,0040	1'26''	-3,2''
5,3	0,2''	-0,0022	1'07''	-6,2''
0	0	0	0	0

Сравнив результаты с аберрациями системы, полученной при расчете с объективом, склеенным из двух линз, убеждаемся, что достигнута значительно лучшая коррекция

#### 4. 6 Окуляры зрительных труб, выполненных по схеме Кеплера. Оптические схемы и методы расчета

Основными характеристиками окуляров являются угловое поле  $2\omega'$  и соотношение между задним фокальным отрезком  $s'_F$  и фокусным расстоянием  $f'$  :  $t = s'_F/f'$ , определяющее параксиальное положение выходного зрачка относительно последней поверхности  $z'_{p,0}$ . В зрительной трубе, состоящей из объектива, призмной оборачивающей системы и

окуляра, положение выходного зрачка относительно последней поверхности определяется:

$$z'_{p,0} = s'_{F'} + f'_{\text{ок}} / |\Gamma|,$$

где  $s'_{F'}$  – задний фокальный отрезок,  $\Gamma$  – видимое увеличение зрительной трубы.

Схематично работа окуляра в составе зрительной трубы показана на рис. 4.9

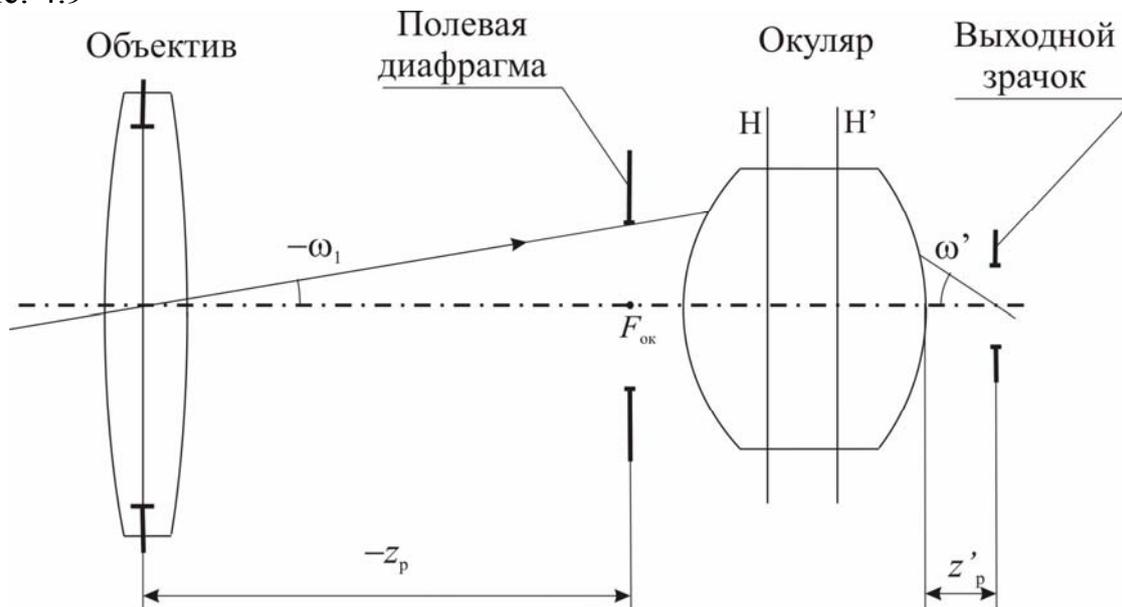


Рис. 4.9 Схема зрительной трубы

Реальное положение выходного зрачка, обеспечивающее наблюдение поля изображения за счет периферийного зрения, то есть без поворота глаза, определяется с учетом сферической aberrации в выходном зрачке  $\Delta z'_p = z'_1 - z'_{p,0}$ . Наличие этой aberrации в общем случае приводит к виньетированию наклонных пучков лучей, которое в неблагоприятном случае вызывает эффект, когда при подвижке глаза наблюдателя вдоль оси не удастся видеть все поле изображения целиком без затемнения отдельных его зон. Действие сферической aberrации в выходном зрачке на виньетирование поясняется рис. 4.10.

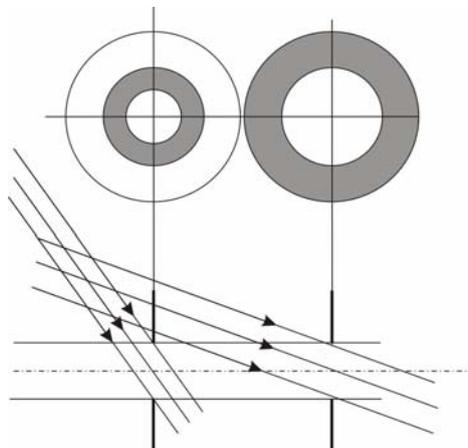


Рис. 4.10 Сферическая aberrация в зрачках

В зрительных трубах допускаются достаточно большие аберрации на краях поля, снижающие разрешающую способность. Так, например, в бинокле 8 x 30, выпускавшемся в массовых количествах во время Великой Отечественной Войны, разрешающая способность в центре поля составляла 6", а на краю поля 60".

По общепринятым, но официально не зафиксированным нормам, допустимый хроматизм увеличения зрительной трубы, определяемый, в основном, окуляром, составляет 5', хотя в вышеупомянутом бинокле он достигает 10'. Астигматические составляющие, зависящие, главным образом, от трудно исправимой кривизны изображения, допускаются в пределах  $Z'_m = 3...5$  дптр,  $Z'_s = 3...5$  дптр. Наиболее распространенной является коррекция, когда  $Z'_m = -Z'_s$ . В то же время возможна коррекция  $Z'_m = Z'_s = Z'_p$ . В этом случае наблюдатель ставит фокусировку окуляра в положение  $Z'_p$  и наблюдает центр поля с соответствующей аккомодацией, а края поля – без аккомодации. Такая коррекция является наиболее целесообразной в стационарных зрительных трубах.

Допустимая дисторсия зрительных труб составляет 5%. В то же время в вышеупомянутом бинокле 8 x 30 она достигает 10%. Дисторсия зрительной трубы полностью зависит от окуляра.

При оценке внеосевых аберраций зрительных труб и, соответственно, окуляров, нужно учитывать условия работы. Так, в биноклях и зрительных трубах, удерживаемых в руках, человек, видя края поля изображения за счет периферийного зрения и отметив там некоторое движение, поворачивает голову вместе с биноклем и переводит «подозрительный» участок в центр. В таких случаях края поля изображения окуляра воспринимаются периферическим зрением и могут обладать большими аберрациями. В приборах, размещаемых стационарно, например, в танковых панорамах, стереотрубах и т.п., перевод крайних зон поля изображения в центр занимает существенное время, поэтому наблюдатель вынужден рассматривать края поля изображения, поворачивая глаз.

Осевые аберрации окуляров без особого труда компенсируются остальными компонентами зрительной трубы, а именно, в основном, объективом, а также призмёнными системами. Линзовые оборачивающие системы, как правило, корригируются самостоятельно.

При синтезе окуляров использование метода Г.Г.Слюсарева в большинстве случаев нецелесообразно, поскольку полагать толщины линз малыми нельзя. Толщины линз соизмеримы с фокусным расстоянием окуляра. Кроме того, углы главного луча с осью составляют десятки градусов, когда использование формул аберраций третьего порядка приводит к существенным погрешностям. Исключение составляют симметричные окуляры, состоящие из пары двухкомпонентных систем, разделенных воздушным промежутком.

При синтезе окуляров труб Кеплера, обладающих положительной оптической силой, применяется метод М.М.Русинова, заключающийся в последовательном построении системы из отдельных изопланатических, конфокальных и апланатических поверхностей.

Далее приводятся несколько современных оригинальных оптических схем окуляров с численными значениями их конструктивных параметров (см. ПРИЛОЖЕНИЕ I).

При расчете зрительных труб, как правило, стараются использовать имеющиеся в производстве на данном предприятии окуляры. Если подобрать готовый окуляр не представляется возможным, подбирают окуляр по каталогу с масштабированием под заданное фокусное расстояние. Приведем оптические схемы, конструктивные параметры (см. ПРИЛОЖЕНИЕ I) и внеосевые aberrации некоторых современных окуляров (см. таблицы 4.15, 4.16). За исключением окуляра Эрфле (рис.4.11), их нет в кафедральных каталогах.

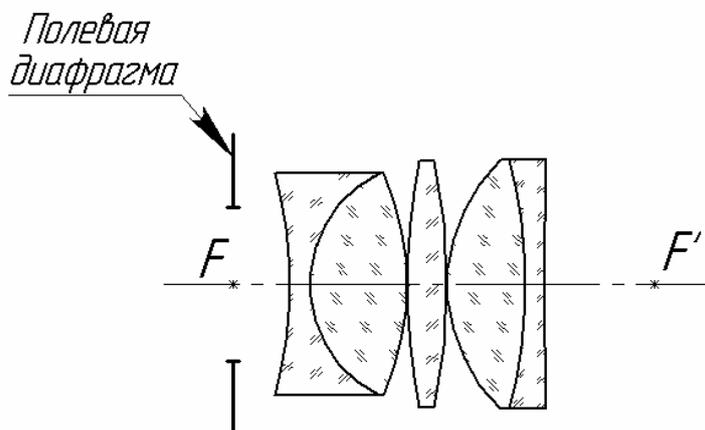


Рис. 4.11 Окуляр Эрфле

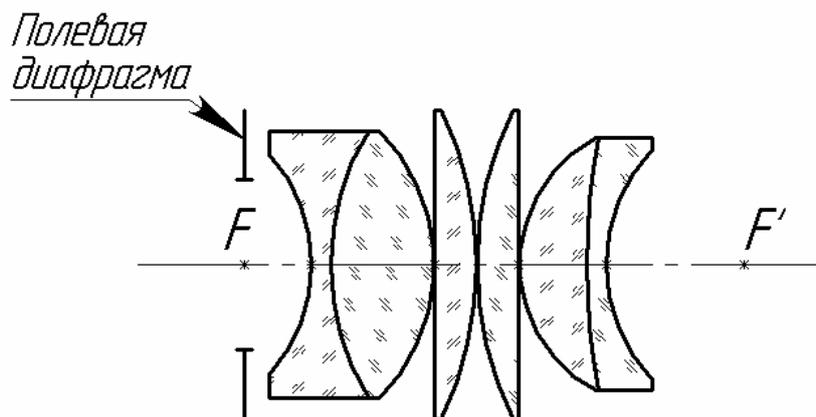


Рис. 4.12 Окуляр ГОИ

Особенностью окуляра ГОИ (рис. 4.12) является вогнутая последняя поверхность, из-за чего при проектировании конструкции необходимо учитывать, что в значение величины удаления зрачка входит стрелка прогиба последней поверхности, составляющая примерно 5 мм (при

фокусном расстоянии  $f' = 25$  мм). Благодаря наличию первой и последней вогнутых поверхностей в окуляре достигнута хорошая коррекция астигматических составляющих  $Z'_m, Z'_s$ .

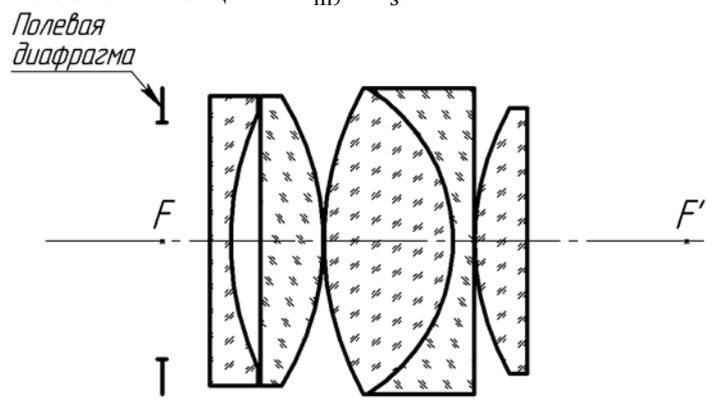


Рис. 4.13 Окуляр Русинова

Окуляр Русинова (рис. 4.13) отличается простотой и технологичностью конструкции (4 плоские поверхности). Однако он обладает довольно большим хроматизмом увеличения. Тем не менее, при наблюдении в дневное время хроматизм увеличения мало заметен. Но при наличии светящихся источников света в поле зрения хроматизм увеличения проявляется в том, что изображения внеосевых точек приобретают вид радужных линий.

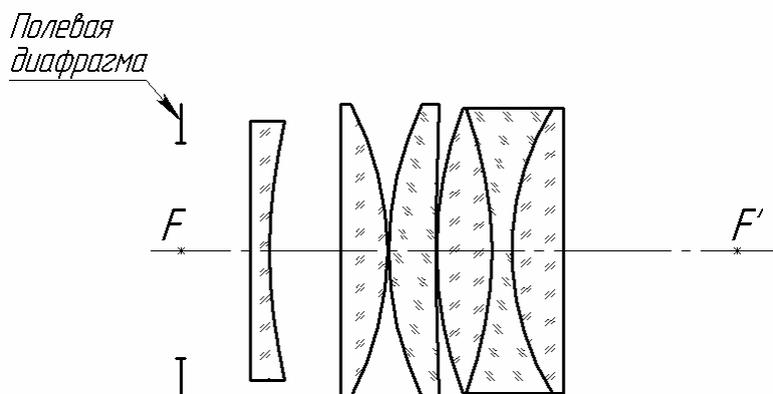


Рис. 4.14 Окуляр ЛИТМО

В окуляре ЛИТМО (рис.4.14) за счет некоторого усложнения конструкции уменьшен хроматизм увеличения.

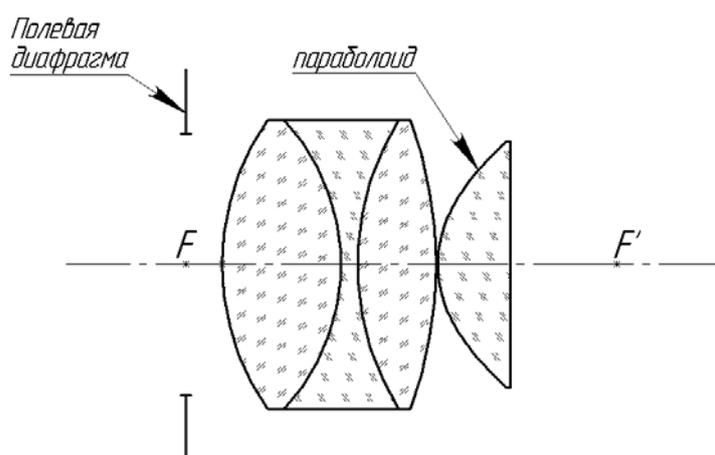


Рис. 4.15 Трофейный окуляр

Недостатком окуляра (рис. 4.15) является малое удаление выходного зрачка.

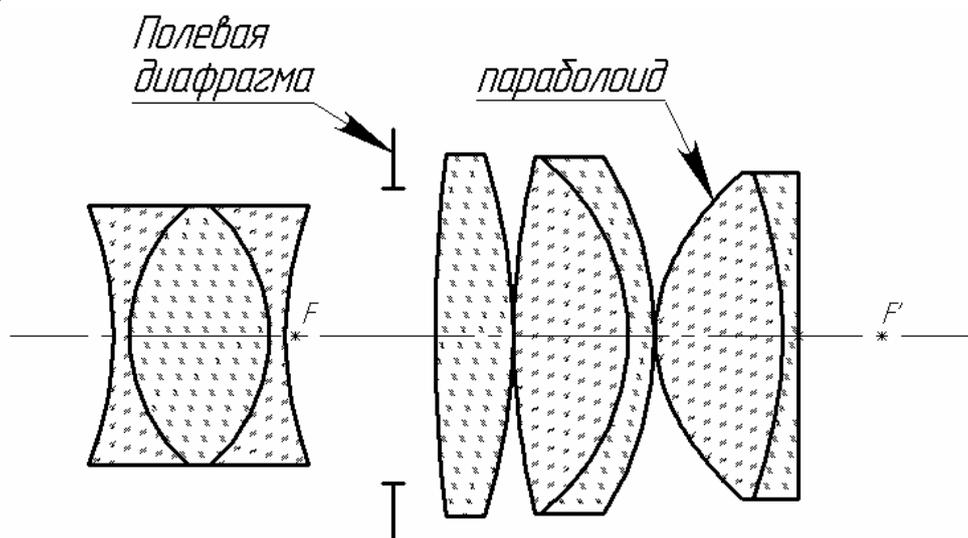


Рис. 4.16 Широкоугольный окуляр

В широкоугольном окуляре (рис. 4.16) при рекордно большом угловом поле отлично исправлены полевые aberrации. Отличительной особенностью является расположение полевой диафрагмы внутри окуляра.

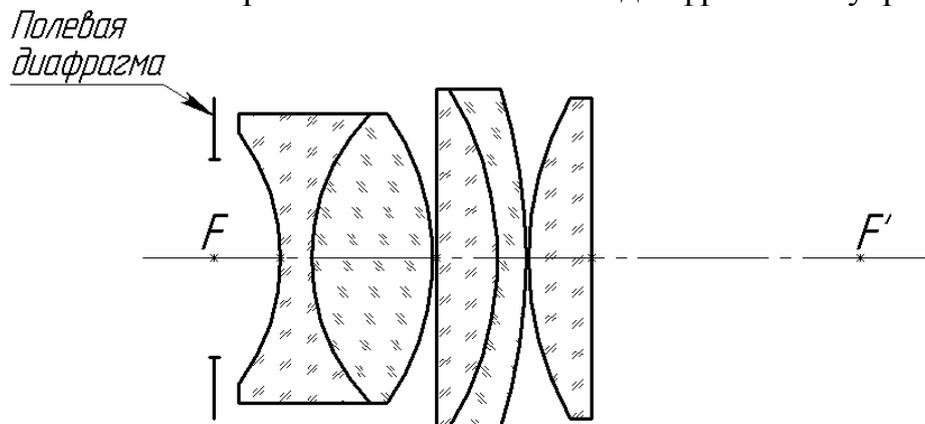


Рис. 4.17 Окуляр с удаленным зрачком

Пятилинзовый окуляр удаленным зрачком (рис. 4.17) с полем  $2\omega = 50^\circ$  представляет собой модернизацию традиционного окуляра с удаленным зрачком, также состоящего из 5 линз. Модернизация окуляра осуществлялась путем изменения расположения склеенных и одиночных линз, а также за счет применения тяжелых стекол марок ТФ10, СТК19. В результате достигнуто существенное увеличение выходного зрачка с  $t = 0,8$  до  $t = 1,22$ . Кроме того, две поверхности окуляра плоские.

Таблица 4.15 Типы окуляров и их особенности

№ рис.	$2\omega,^\circ$	$S'_F/f'$	Название	Технологические преимущества
4.11	56	0,73	Окуляр Эрфле	$r_5 = r_6$
4.12	60	0,77	Окуляр ГОИ	$r_1 = r_{10}, r_5 = r_6, r_4 = r_7 = \infty$
4.13	72	0,69	Окуляр Русинова	$r_1 = r_{10} = r_4 = r_7 = \infty$
4.14	70	0,61	Окуляр ЛИТМО	$r_2 = r_4 = r_{11} = \infty$
4.15	80	0,49	Трофейный окуляр	$r_5$ – параболоид, $r_6 = \infty$
4.16	90	0,64	Широкоугольный окуляр	$r_{11}$ – параболоид, $r_{13} = \infty$
4.17	50	1,2	Окуляр с удаленным зрачком	$r_1 = r_5 = \infty, r_{11} = -r_8$

Таблица 4.16 Аберрации окуляров

№ рис.	$z'_{p,0}$	$z'_p$	$\bar{z}'_m$	$\bar{z}'_s$	DIS, %	$\sigma'(F'-C')_1$	$\sigma'(F'-C')_3$
4.11	25	24,5	-0,97	1,28	6,6	-3'35"	4'05"
4.12	22,3	23,1	-0,051	0,73	5,8	-56"	5'25"
4.13	20,3	20,4	-0,459	1,73	6,4	-6'40"	8'12"
4.14	21,1	19,5	-1,92	0,94	6,9	-2'50"	2'
4.15	15,3	17,8	-2,98	2,42	9,5	-5'11"	4'
4.16	18,7	18,8	0	1,87	2,25	-1'30"	5'50"
4.17	33,33	32,9	-2,23	0,3	5,36	-6'30"	4'

Для всех приведенных в таблице окуляров расчеты выполнены для  $z_p = -200$  мм. В таблице величины  $\bar{z}'_m, \bar{z}'_s$  представляют собой произведения  $Z'_m$  и  $Z'_s$ , вычисленные в прямом ходе лучей, умноженные на соответствующие  $\cos \omega'_i$ , то есть величины, воспринимаемые глазом после поворота на угол  $\omega'_i$  (см. рис. 4.18). Здесь  $i$  – номер пучка лучей в обозначениях САРО. Эти значения приведены не на краю поля, а максимумы в пределах поля. Все данные для удобства сравнения приведены для фокусного расстояния  $f'_{ок} = 25$  мм.

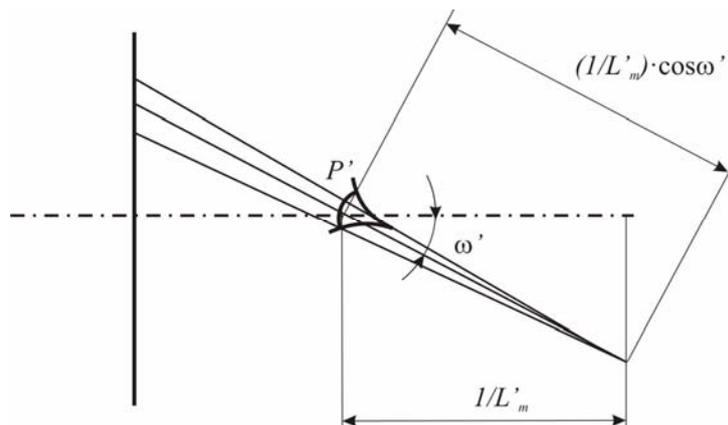


Рис. 4.18 Пояснения к таблице 4.16

Расчет окуляров ведется от прототипа путем замены марок стекол и /или усложнения конструкции, например, замены одиночных линз на склеенные компоненты.

Если полевые aberrации выбранного окуляра не обеспечивают удовлетворительного качества изображения в крайних зонах поля, то выполняется автоматизированная коррекция, методы выполнения которой рассмотрим на примере модернизации окуляра Эрфле бинокля 8 x 30.

Целью модернизации является уменьшение дисторсии и хроматизма увеличения этого окуляра. Значения этих aberrаций приведены в первой строке таблицы 4.16. Улучшение этих aberrаций может быть достигнуто путем замены стекол с небольшими показателями преломления в исходной системе (К8, Ф2) на стекла групп СТК и ТФ. При такой замене происходит увеличение по абсолютному значению радиусов кривизны преломляющих поверхностей, сопровождаемое уменьшением высших порядков aberrаций  $Z'_m$ ,  $Z'_s$ , дисторсии и хроматизма увеличения (точнее, хроматической разности дисторсий).

Аберрационный расчет окуляра принято осуществлять в обратном ходе лучей. Конструктивные параметры окуляра в обратном ходе лучей приведены в таблице 4.17. Последняя поверхность – полевая диафрагма, диаметром 15 мм. Диаметр зрачка 3,8 мм, угловое поле  $2\omega = 56^\circ$ . Роль апертурной диафрагмы выполняет оправа объектива, которая расположена после 9-ой поверхности на расстоянии, равном фокусному расстоянию объектива, то есть  $\bar{z}'_p = f'_{об} \cong 123,8$ .

Таблица 4.17 Конструктивные параметры окуляра Эрфле

Радиусы	Толщины	Марки стекол
104,81	1,5	1
22,01	7,5	Ф2
-19,31	0,55	К8
37,44	5,5	1
-37,44	0,5	К8
22,01	8,5	1
-22,01	1,5	К8
38,04	5,18	Ф2
$\infty$		1
		1

В качестве коррекционных параметров будем использовать радиусы оптических поверхностей. Применение углов  $\alpha_i$  в большинстве окуляров нерационально, поскольку в процессе расчета могут появиться поверхности, расположенные вблизи от фокуса, когда высоты  $h_i \approx 0$ . В этом случае при вычислении кривизны поверхности  $\rho_i$  возникает неопределенность вида  $0/0$ . Кроме того, при использовании  $r_i$  возможно осуществление равенства между некоторыми радиусами, что целесообразно с технологической точки зрения. Так, в рассматриваемом случае  $r_2 = r_6 = -r_7$ ,  $r_4 = -r_5$  (см. таблицу 4.17).

Астигматические отрезки в окуляре  $Z'_m = 0,75$ ,  $Z'_s = -0,63$ . Дисторсия составляет  $\Delta l'_1 = -0,73$  при  $l'_1 = 7,54$ , то есть  $\Delta l'/l'(0) = -0,73/(7,54 + 0,73) = -0,088 = -8,8\%$ . Хроматизм увеличения  $l'_1(F'-C') = -0,066$ , что в пространстве изображений бинокля составит  $0,066/f'_{ок} = 0,066/15,6 = 0,0042$  рад  $\approx 14'$ . За счёт аберраций призм в бинокле дисторсия составляет  $9,6\%$ , а хроматизм увеличения  $10'$ . Таким образом, целью модернизации является уменьшение этих аберраций до допустимых пределов.

Модернизацию выполним путем замены обычных легких стекол на более тяжелые, а именно заменим Ф2 ( $n_e = 1,6205$ ) на ТФ4 ( $n_e = 1,7462$ ), а К8 ( $n_e = 1,5183$ ) на СТК3 ( $n_e = 1,6622$ ).

Выполним автоматизированную коррекцию, расчет будем вести в обратном ходе лучей. В качестве коррекционных параметров используем радиусы  $r_1, r_2, r_3, \Delta r_4 = -\Delta r_5, r_6, r_7, r_8$ . Корректируемые функции:

фокусное расстояние  $f' = 15,6 \pm 0,1$  мм;

дисторсия  $\Delta l' = -0,4 \pm 0,05$ ;

астигматизм  $Z'_m + Z'_s = 0 \pm 0,1$ ;

хроматизм увеличения  $l'_1(F'-C') + l'_3(F'-C') = 0 \pm 0,01$ .

В результате коррекции получаем систему, где  $|r_1| > 500$ , что нетехнологично.

Примем  $r_1 = \infty$ , исключив  $r_1$  из числа коррекционных параметров, и повторим коррекцию. В результате получаем систему со следующими значениями конструктивных параметров, представленными в таблице 4.18 (после перехода с помощью требования 4 САРО на радиусы ГОСТ 1807 – 75).

Таблица 4.18 Конструктивные параметры модернизированного окуляра Эрфле

Радиусы	Толщины	Марки стекол
0	2,0	1
102,09	6,0	ТФ4
-18,408	0,1	СТКЗ
59,02	4,0	1
-59,02	0,1	СТКЗ
28,71	8,0	1
-12,764	2,1	СТКЗ
33,96	6,7	ТФ4
0		1
		1

Аберрации точки вне оси составляют: дисторсия  $\Delta l' = -0,39$ , что при  $l'_1 = 7,90$  равно  $\Delta l'/l'(0) = -0,39/(7,90 + 0,39) = -0,047 = -4,7\%$ ;  $l'_3(F'-C') = -0,019$ ;  $l'_1(F'-C') = 0,027$ ;  $Z'_m = 1,24$ ,  $Z'_s = -0,98$ . Дисторсия и хроматизм увеличения существенно улучшились. Удаление выходного зрачка возросло с 10,7 мм до 15,5 мм, что весьма благоприятно для наблюдателя. Несколько возрос астигматизм.

Приведенный пример показывает, что модернизация окуляров может выполняться путём замены лёгких стёкол на более тяжёлые. Назовём полученный в результате расчёта окуляр модернизированным окуляром Эрфле.

Таким образом, при абберационном расчёте окуляров в качестве корригируемых функций следует использовать только внеосевые аберрации, а именно, дисторсию, хроматизм увеличения и астигматизм. Во всех типах окуляров наблюдаются высшие порядки хроматизма увеличения, то есть хроматическая дисторсия. При расчёте в обратном ходе лучей, как правило, имеет место соотношение:  $l'_1(F'-C') - l'_3(F'-C') > 0$ . Оптимальная коррекция имеет место, когда  $l'_1(F'-C') - l'_3(F'-C') = 0$ .

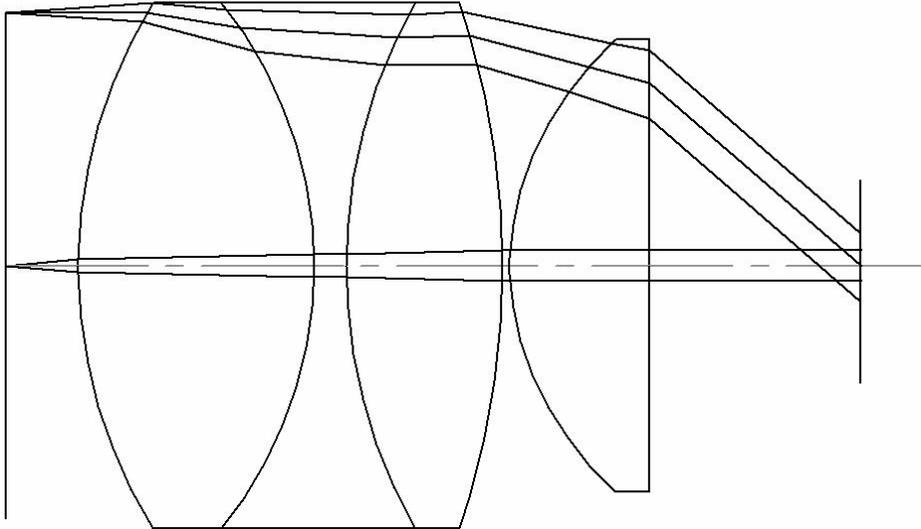
Не следует стремиться к полному устранению дисторсии. Как показывает практика, при этом возникают трудности с коррекцией астигматизма, а также зрительный дискомфорт. Оптимальное значение дисторсии составляет  $-5\%$ . Коррекция астигматизма осуществляется с учетом астигматических составляющих объектива и оборачивающей

системы так, чтобы суммарные значения этой аберрации удовлетворяли бы условиям:  $\Sigma Z'_m = -\Sigma Z'_s$  или  $Z'_m = Z'_s$ . Коррекцию следует начинать с прототипа, используя в качестве коррекционных параметров радиусы. В этом случае при дальнейшем расчете можно улучшить технологичность окуляра, заменив некоторые радиусы  $r = \infty$  или установив попарное равенство. Толщины, как правило, не являются эффективными коррекционными параметрами.

#### *Аберрационное виньетирование в окулярах*

Явление аберрационного виньетирования рассмотрим на примере трофейного окуляра. Окуляр с угловым полем  $2\omega = 80^\circ$  (рис.4.15) был установлен в прицеле бомбометания на немецком самолете, сбитом во время Великой Отечественной войны. Прицел был разобран, а оптические детали обмерены в ГОИ. Впервые было обнаружено, что одна из поверхностей окуляра, а именно, выпуклая поверхность глазной линзы, имеет параболоидальную форму. Там же был выполнен расчет окуляра с использованием отечественных марок стекол. Одновременно были начаты и в кратчайший срок успешно завершены работы по созданию специализированного станка «Парабола», позволяющего изготавливать с невысокой точностью параболоидальные поверхности с диаметром в десятки миллиметров.

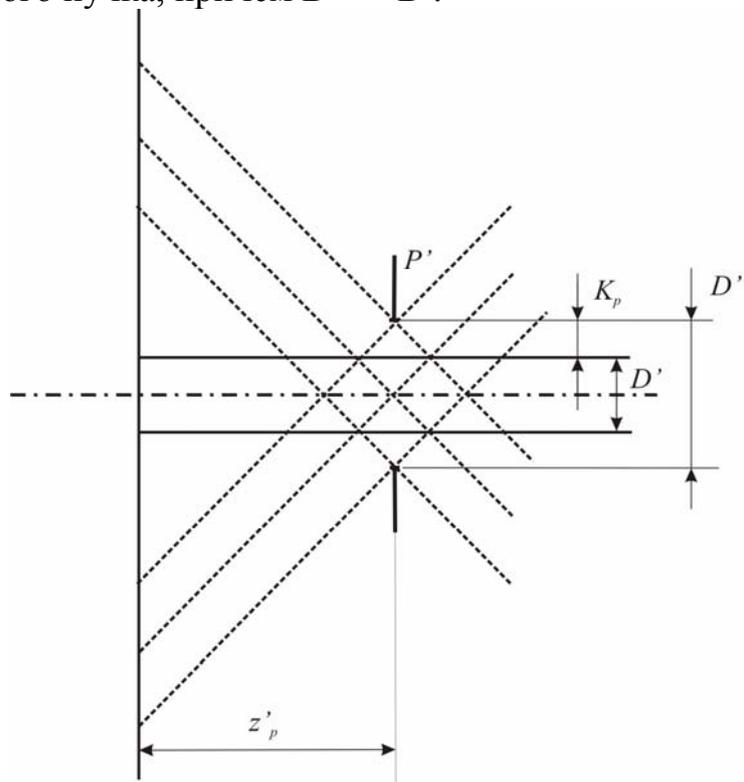
В начале 50-х годов прошлого столетия на заводе «Прогресс», вошедшего впоследствии в объединение ЛОМО, разрабатывался прицел для корабельной артиллерийской башни, где был использован этот окуляр. Оптическая схема рассчитывалась по традиционной технологии, то есть по частям. При присоединении окуляра к предшествующей системе, состоящей из объектива, а также линзовой и призмной оборачивающей систем, было обнаружено необычное явление, заключающееся в существенном расширении наклонных меридиональных пучков лучей по отношению к осевому пучку. Ход меридиональных пучков лучей в этом окуляре наглядно представлен на рис. 4.19.



*Рис. 4.19* Ход меридиональных лучей в окуляре при абберационном виньетировании

На основании расчета хода лучей ширина крайнего пучка составляет 6,07 мм, а осевого 4 мм.

Рассмотрим изображение апертурной диафрагмы – выходного зрачка, создаваемое окуляром. На рис. 4.20  $P'$  – плоскость выходного зрачка. Сферическая абберация в зрачке отсутствует, поэтому главный луч пересекает ось в точке, где плоскость зрачка пересекает ось. На рис. 4.20, где  $D'$  – диаметр выходного зрачка,  $D''$  – размер (ширина) наклонного меридионального пучка, причем  $D'' \gg D'$ .



*Рис. 4.20* К абберационному виньетированию

Нетрудно понять, что расширение пучка является следствием возникновения положительной комы в зрачке. Воспользуемся условием Штебле – Лихоцкого [7] для оценки величины этой комы:

$$K_p = 3\eta D'/2,$$

$$\text{где } \eta = \frac{\Delta V_p}{V_{p,0}} + \frac{\Delta z'_p}{s'_0 - z'_p}, \quad (4.7)$$

$V_{p,0}$  – увеличение в зрачках,

$\Delta z'_p$  – сферическая абберация в зрачках.

Поскольку  $s'_0 = \infty$ , то  $\eta = \Delta V_{p,0}/V_{p,0}$ , где, в свою очередь,

$$V_p = \frac{\sin \omega_1}{\sin \omega'}, \quad (4.8)$$

$$V_{p,0} = \frac{\text{tg} \omega_1}{\text{tg} \omega' (1 + \bar{\Delta})} = \frac{\text{tg} \omega_1}{\text{tg} \omega' (1 - \bar{\Delta})}. \quad (4.9)$$

Здесь  $\bar{\Delta}$ ,  $\bar{\Delta}$  – относительная дисторсия соответственно в прямом и обратном ходе лучей. После выполнения элементарных тригонометрических преобразований окончательно получим:

$$\eta = \frac{\cos \omega_1}{\cos \omega' (1 - \bar{\Delta})} - 1, \quad (4.10)$$

Кома в зрачке  $K_p = 3\eta H'_1$ ,

где  $H'_1$  – радиус выходного зрачка для осевого пучка лучей,  $H'_1 = D'/2$ .

Коэффициент абберационного виньетирования (4) может быть рассчитан по формуле:

$$K_p = \frac{D''}{D'} = \frac{D' + 3\eta D'}{D'} = 1 + 3\eta \quad (4.11)$$

Оценим порядок величины  $K_p$ . Будем полагать, что дисторсия  $\bar{\Delta}$  в окуляре равна допустимой величине  $\bar{\Delta} = 5\% = -0,05$ . Практикой установлено, что дисторсия во всех типах окуляров отрицательная. Величину  $\cos \omega_1$  можно принять равной единице, что практически имеет место при больших видимых увеличениях  $\Gamma$ . Видимое поле окуляра примем  $\omega_1 \geq 30^\circ$ , что соответствует угловому полю современных приборов. Тогда из формул (4.10), (4.11) получаем  $K_p = 1,3$ , то есть расширение наклонного пучка на 30%. Абберационное виньетирование, как правило, компенсирует виньетирование, вызванное сферической абберацией выходного зрачка.

Проверим точность полученной формулы (4) на примере окуляра с полем  $2\omega' = 80^\circ$ , который назовем «трофейным». Его конструктивные параметры в прямом ходе лучей, что соответствует рис.4.19, представлены в таблице 4.19, где  $r_1$  – плоскость полевой диафрагмы.

Таблица 4.19 Конструктивные параметры трофейного окуляра

Радиусы	ASF/A	Толщины	Марки стекол
0	102	6,12	1
43,28	1	19,93	1
-36,13	1	2,74	ТК23
46,45	-37.34	13,19	ТФ4
-71,7	0	0,3	БК10
A		12,14	1
0			БК8
			1

Начальные данные для расчета хода лучей  $s_1 = 0$ ,  $z_p = -200$ , величина предмета  $l_1 = 20,7$ . Угловое поле  $\omega' = 38^\circ 03'$ . Аберрация в зрачке  $\Delta z'_p = 2,7$ , дисторсия  $\bar{\Delta} = 7,7\%$ .

Коэффициент аберрационного виньетирования  $K_p = 6,07/4 = 1,518$ . По формулам:

$$K_p = 1 + 3 \left( \frac{0,995}{0,788 \cdot 1,077} - 1 \right) = 1 + 3 \cdot 0,172 = 1,516$$

Обратим внимание, что растяжение наклонных меридиональных пучков – аберрационное виньетирование – имеет место практически всегда и мало зависит от конструкции окуляра. При расчете окуляров в обратном ходе лучей аберрационное виньетирование проявляется в уменьшении апертуры в меридиональном сечении наклонных пучков.

#### 4.7 Расчет зрительной трубы Галилея

Телескопическая система (трубка Галилея) может использоваться как театральный бинокль, когда к качеству изображения предъявляются невысокие требования и как элемент для скачкообразной смены увеличения при установке ее перед телескопической системой Кеплера попеременно в прямом и обратном ходе лучей. В последнем случае к коррекции аберраций осевой точки предъявляются жесткие требования (дифракционное качество изображения). Системы Галилея с различными видимыми увеличениями  $\Gamma$  используются также в стереомикроскопе Аббе.

Оптическая схема трубки Галилея представлена на рис. 4.21. Фокусные расстояния объектива ( $f'_1$ ) и окуляра ( $f'_2$ ) и расстояние между компонентами  $d$  при заданном видимом увеличении  $\Gamma$ , диаметре зрачка  $D$  и относительном отверстии  $1:K$  вычисляются по формулам:

$$f'_1 = K \cdot D, \quad (4.12)$$

$$f'_2 = -\frac{f'_1}{\Gamma}, \quad (4.13)$$

$$d = f'_1 + f'_2 \quad (4.14)$$

При коррекции монохроматических aberrаций трубки Галилея, состоящей из двух компонентов, каждый из которых представляет собой склейку из двух линз, имеются четыре свободных параметра  $P_I^*$ ,  $W_I^*$ ,  $P_{II}^*$ ,  $W_{II}^*$ , а количество корригируемых функций (aberrаций) составляет три: сферическая aberrация, кома и астигматизм. Кривизна изображения в простой трубке Галилея не поддается коррекции и зависит только от суммы оптических сил объектива и окуляра. Дисторсия практически отсутствует из-за малости полевого угла. Таким образом, имеется один свободный параметр, который целесообразно использовать, выполняя условие  $P_I^* = P_{II}^* = 0$ , что облегчает контроль качества изготовления. Тогда из формул, приведенных в [11] вытекает условие: коррекция комы и астигматизма достигается при  $W_I^* = W_{II}^* = 0,5$  независимо от видимого увеличения трубки.

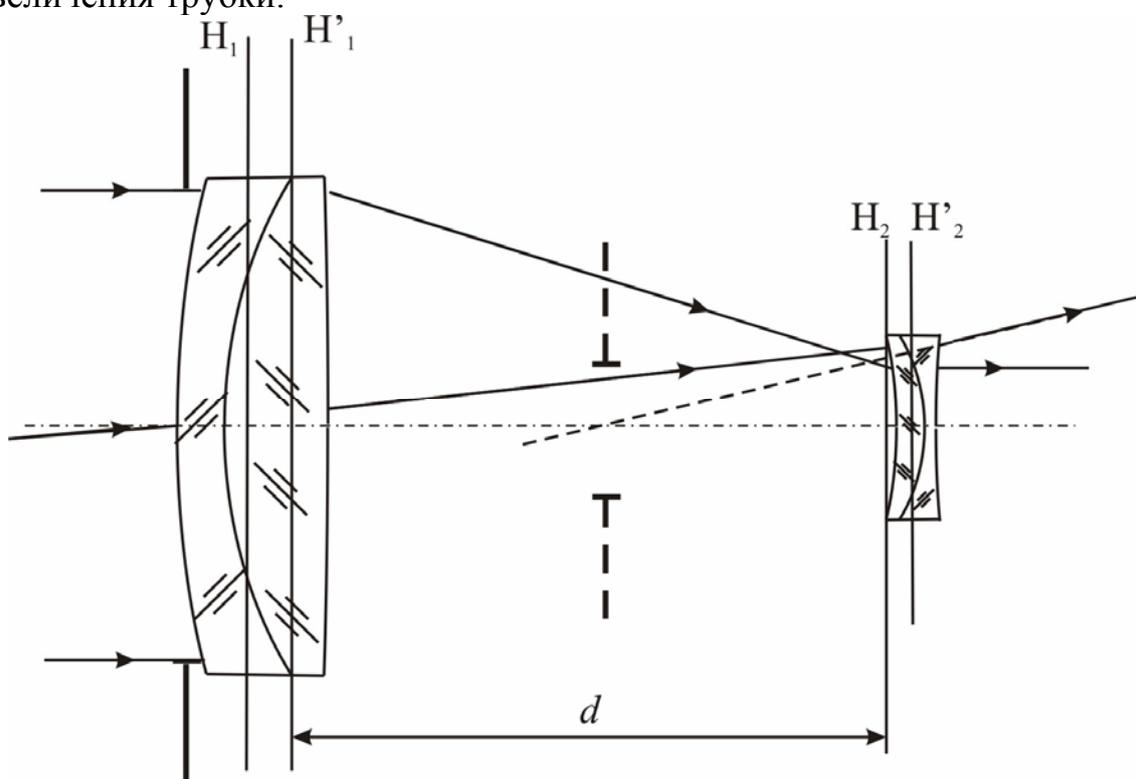


Рис. 4.21 Зрительная труба Галилея

Поскольку для обоих компонентов параметр Г.Г. Слюсарева  $P_0 = -0,85(W^* - 0,14)^2 = -0,11$ , а для устранения хроматических aberrаций следует принять  $C_I = C_{II} = 0$ , то оба компонента могут быть выполнены из одинаковых комбинаций стекол. Однако для уменьшения сферической aberrации пятого порядка и, имея в виду, что эта aberrация у объектива и окуляра имеет противоположные по знаку величины и соотносятся как  $\Gamma$ , целесообразно подобрать соответствующие комбинации стекол, позволяющие частично или полностью компенсировать сферическую aberrацию пятого порядка. В разделе 4.1 было показано, что остаточная сферическая aberrация склеенных объективов может различаться до трех раз, то соответствующим подбором комбинации стекол можно

компенсировать сферическую aberrацию пятого порядка для  $\Gamma \leq 3$ . Из таблиц [18] следует, что при  $C=0$  и  $P_0 \approx -0,1$  для объектива можно использовать комбинации стекол: ТФ1– ЛК6, ТФ4– БФ1, Ф6– ТК2, ТФ7– БФ1, Ф9– К19, ТФ1– ЛК1, Ф9– БФ4, ТФ5– БФ13. Комбинации стекол для расчета окуляра: БК13–Ф1, БК13–Ф4, БК13 – Ф13, ЛК6 – ТФ2, К19 – ТФ8, БК10 – ТФ3. Следует помнить, что расчет окуляра выполняется в обратном ходе лучей, а комбинации стекол приведены в порядке для прямого хода лучей.

Выполним расчет и автоматизированную коррекцию объектива для следующих исходных данных: фокусное расстояние  $f' = 88$ ,  $D = 22$ ,  $2\omega \approx 3^\circ$ . Минимальными остаточными aberrациями из приведенных для объектива комбинаций стекол обладает сочетание ТФ5 – БФ13, где линза из баритового флинта – положительная. Выполнив аналогичный расчет для окуляра в обратном ходе при  $f' = -35,2$ ,  $D = 8,8$ , можно убедиться, что остаточная сферическая aberrация для сочетания стекол БК13–Ф1 наиболее близка к величине остаточной aberrации объектива. Объединяя объектив и окуляр в систему, после автоматизированной коррекции и перехода к радиусам ГОСТ получим конструктивные параметры системы, приведенные в табл. 4.20.

Табл. 4.20 Конструктивные параметры оптической системы трубки Галилея

Радиусы	Толщины	Марки стекол
54,45	3	1
25,82	5,5	ТФ5
-315,5	45,81	БФ13
-44,67	3,4	1
-11,614	2	Ф1
29,79		БК13
		1

В табл. 4.21 – 4.22 приведены aberrации рассчитанной оптической системы.

Табл. 4.21 Aberrации осевого пучка трубки Галилея

H, мм	$\sigma'(0)$	$\eta$ , %	$\sigma'(1)$	$\sigma'(2)$
11,0	3,1''	0,0	-5,7''	-35,7''
9,53	3,0''	0,03	-7,2''	-27,6''
7,78	3,2''	0,035	-7,5''	-19,0''
5,5	2,8''	0,024	-6,5''	-10,9''
0	0	0	0	0

Табл. 4.22 Аберрации бесконечно тонких астигматических пучков трубки Галилея

$\sin \omega$	$L'_m$	$L'_s$	$L'_m - L'_s$
0,0184	-0,0052	-0,0054	0,0
0,026	-0,0169	-0,0172	0,0

На рис. 4.21 приведена схема рассчитанной трубки Галилея.



Рис. 4.21 Схема трубки Галилея  $\Gamma = 2,5$ ,  $D = 22$ ,  $2\omega \approx 3^\circ$ .

#### 4.8 Расчет объектива типа Петцваля с сочетанием методов Г.Г. Слюсарева и М.М. Русинова

Во время Великой Отечественной войны профессор Д.С. Волосов разработал фотографический телеобъектив Таир-3 с фокусным расстоянием 300 мм и диафрагменным числом  $K = 4,5$  (размер кадра 24 мм x 36 мм), удостоенный Гран-при на Всемирной выставке в Брюсселе 1958 г. [20] Объектив предназначался в основном для съемок в разведывательных целях, например, передовой линии фронта. Объективами Таир-3 комплектовались фотоаппараты «Фотоснайпер» [21]. Объектив обладал фотографической разрешающей способностью 45 л/мм в центре поля и 38 л/мм на краю поля. Объектив состоит из двух компонентов, первый из которых – две линзы, разделенные малым воздушным промежутком, второй компонент – одиночный мениск, обращенный вогнутой стороной к изображению.

Приведем пример расчета объектива с аналогичными характеристиками, используя методы Г.Г. Слюсарева и М.М. Русинова. В качестве приемника изображения используем цветную матрицу ПЗС с диагональю 9,04 мм (тип 1/1,8), размеры 5 x 7,5 мм, 5 Мп. Фокусное расстояние объектива найдем из соотношения:

$$f' = (5/24) \cdot 300 = 62,5 \text{ мм}$$

Учитывая высокое разрешение приемника изображения, можно поставить задачу получения дифракционного качества изображения при диафрагменном числе  $K \leq 2,8$ .

Перед началом разработки оптической системы объектива необходимо определить, какой тип коррекции хроматической аберрации (ахроматическую или апохроматическую) требуется осуществить, чтобы

обеспечить дифракционное качество изображения во всем диапазоне длин волн. Для этого целесообразно использовать специальную тест-систему с исправленными сферической абберацией, хроматизмом положения и сферохроматической абберацией. Система состоит из двух линз, выполненных из стекол ТФ4 и СТК19, что в соответствии с таблицей 1.1 приводит к несколько увеличенному вторичному спектру, чем пара стекол, лежащих на нормальной прямой. Тест-система имеет конструктивные параметры, приведенные в таблице 4.23.

Табл. 4.23 Конструктивные параметры тест-системы

Радиусы	ASF	Толщины	Марки стекол
A	104	1,8	1
19,131	1	1,2576	ТФ4
21,9876	1	4,2	1
-160,224	-93		СТК19
	2,9372		1
	0,43108		
	0,02792		

Фокусное расстояние 60 мм, диафрагменное число  $K = 2,5$ , спектральный диапазон  $F' - C'$ , основная длина волны  $e$ . Расчетные длины волн  $\lambda_0 = 546,07$  нм,  $\lambda_1 = 435,8$  нм,  $\lambda_2 = 450$  нм,  $\lambda_3 = 480$  нм,  $\lambda_4 = 520$  нм,  $\lambda_5 = 587$  нм,  $\lambda_6 = 643,8$  нм. Использовать тест-систему можно только при  $K \geq 2,5$ . Предварительно необходимо масштабировать тест-систему на требуемое фокусное расстояние (требование 3 «трансформировать оптическую систему» и 4 «масштабирование» программы SAPO) и установить требуемое диафрагменное число, а также задать необходимую начальную и конечную частоту и шаг (в программе SAPO) для вычисления частотно-контрастной характеристики. С помощью требования 20 SAPO определим коэффициент передачи контраста (КПК). Для точного определения полихроматического КПК рекомендуется использовать требование 40 программы SAPO, в этом требовании КПК рассчитывается для большого числа длин волн (до 50).

Для рассматриваемого примера  $f' = 62,5$ ,  $H_{\max} = 62,5/(2 \cdot 2,8) = 11,2$ . Конечная частота 185 л/мм, шаг примем равным 18,5. Расчет КПК по требованию 20 программы SAPO дает для частоты 185 л/мм для  $\lambda_0 = 546,07$  нм  $T_0 = 0,66$ , для  $\lambda_1 = 435,8$  нм  $T_1 = 0$ , для  $\lambda_2 = 450$  нм  $T_2 = 0,0$ , для  $\lambda_3 = 480$  нм  $T_3 = 0$ , для  $\lambda_4 = 520$  нм  $T_4 = 0,31$ , для  $\lambda_5 = 587$  нм  $T_5 = 0,62$ , для  $\lambda_6 = 643,8$  нм  $T_6 = 0,07$ . Очевидно, что дифракционное качество для всего спектрального диапазона при ахроматической коррекции не может быть обеспечено, необходима апохроматическая коррекция.

Диафрагменное число  $K = 2,8$  обеспечивает при исправлении сферической абберации высокий коэффициент передачи контраста  $T = 0,66$ .

Первый компонент объектива выполним из двух линз с малым воздушным промежутком. Его фокусное расстояние  $f'_1 = f' n_{II}$ , где  $f'$  – фокусное расстояние объектива,  $n_{II}$  – показатель преломления второго компонента, представляющего собой склейку с ахроматическим радиусом.

В качестве основной длины волны при расчете объектива возьмем  $\lambda_0 = 546,07$  нм, дополнительные длины волн  $\lambda_1 = 643,8$  нм и  $\lambda_2 = 480$  нм. Для уменьшения вторичного спектра в первом компоненте используем комбинацию стекол ОК4 – ОФ6, обладающую уменьшенным в семь раз вторичным спектром и наименьшей оптической силой  $\varphi_k$  положительной линзы. Первоначальную коррекцию первого компонента целесообразно выполнить в области аберраций третьего порядка по требованию 7 программы САРО, задавая основные параметры Г.Г.Слюсарева  $P^* = W^* = C^* = 0$ . Затем можно осуществить коррекцию реальных аберраций осевой точки, используя в качестве параметров углы первого параксиального луча  $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  и воздушный промежуток  $d_2$ .

В качестве материалов второго компонента выбираем ОК1 – КФ7 с показателями преломления 1,52389 и 1,5200 соответственно. Эта комбинация обладает уменьшенным в 2,67 раза вторичным спектром. Определяем расстояние между первым и вторым компонентами  $d_4$  с помощью требования 11 САРО (автоматизированная коррекция), задав  $\alpha_6 = \alpha_5$ , а в качестве шестой среды ОК1. Корректируемой функцией является астигматизм, коррекционным параметром –  $d_4$ .

Примем  $\alpha_7 = n_{II} \cdot \alpha_6$ , то есть полагая  $r_6 = \infty$ . Как показано в [7,13,22] в данном случае эта поверхность является изопланатической. В результате получим систему с исправленной комой и астигматизмом, но неисправленными сферической аберрацией, кривизной изображения и хроматизмами положения и увеличения. Для устранения сферической аберрации, возникшей на шестой поверхности, можно изменить конструктивные параметры первого компонента. Однако при этом необходимо сохранить отступление от условия изопланатизма и хроматизм положения, которые в первом компоненте были исправлены. Устранение хроматизма положения в обоих компонентах обеспечит устранение хроматизмов положения и увеличения одновременно. Хроматизм положения второго компонента обеспечим введением ахроматического радиуса.

Выполним коррекцию сферической аберрации, сохраняя полученные  $\eta = 0$  и хроматизм положения, за счет  $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  и  $d_2$  первого компонента. При этом астигматизм не изменится, поскольку входной зрачок совпадает с первым компонентом.

Введем ахроматический радиус во второй компонент, для чего перейдем от  $\alpha_i$  к  $r_i$  и разделим второй компонент по толщине на два, разбив  $d_5$  на  $d_5$  и  $d_6$ . Ахроматический радиус  $r_6 = \infty$ , четвертое стекло КФ7. Корректируем хроматизм положения с помощью  $r_6$ . Получаем систему с

неисправленной кривизной изображения и исправленными остальными aberrациями. Если в плоскость изображения установить коллектив с соответствующей оптической силой, то кривизна изображения будет устранена, а остальные aberrации не изменятся, то есть будут отсутствовать. Но в плоскости изображения находится матрица приемника, поэтому такой прием невозможен. Однако, если коллектив сдвинуть на малую величину относительно плоскости изображения таким образом, чтобы последний отрезок  $s'_0$  превышал расстояние от наружной плоскости защитного стекла приемника до плоскости матрицы, то при этом кривизна изображения не изменится, а остальные aberrации изменятся несущественно. Такой коллектив называется линзой Смита. Изменения aberrаций, вызванные линзой Смита, компенсируются изменениями конструктивных параметров предшествующей части системы.

Установим перед плоскостью изображения тонкую плоскопараллельную пластинку. Осуществим коррекцию кривизны изображения. В данном случае возьмем в качестве корригируемой функции  $Z'_m$ , коррекционные параметры – радиусы плоскопараллельной пластины. Предварительно необходимо перейти от записи системы через  $\alpha_i$  к  $r_i$ . В результате выполнения автоматизированной коррекции получим систему, в которой несколько изменилось фокусное расстояние, а aberrации исправлены не оптимальным образом. Необходимо осуществить коррекцию, используя в качестве коррекционных параметров радиусы  $r_i$ , не используя радиусы линзы Смита. На этапе окончательной коррекции можно включить в число коррекционных параметров воздушные промежутки, при необходимости вводя ограничения, а также радиусы линзы Смита. Поскольку требуется получить дифракционное качество изображения, то необходимо корригировать волновые aberrации. В число корригируемых функций необходимо включить фокусное расстояние  $f' = 63,5$  мм и задний отрезок  $s'_0 = 5$  мм, а в качестве коррекционных параметров можно использовать смещение плоскости установки. Поскольку сферическая aberrация, кома, астигматизм и кривизна изображения, а также хроматизм положения исправлены, то на баланс aberrаций не влияет положения диафрагмы. Установим диафрагму на расстоянии 5 мм от четвертой поверхности. Получим объектив с конструктивными параметрами, приведенными в таблице 4.24. Смещение плоскости установки – 0,025 мм. На рис. 4.22 показана схема объектива.

Табл. 4.24 Конструктивные параметры объектива  
 $f' = 63,6$ ,  $K = 2,53$ ,  $2\omega = 8^\circ$

Радиусы	Толщины	Марки стекол
46,34	6,82	1
-32,507	0,1	ОК4
-32,914	2,5	1
-161,06	36,287	ОФ6
40,18	4,0	1
-29,65	1,5	ОК1
-209,9	25,31	КФ7
-20,32	1,5	1
-92,47		СТК19
		1

Качество изображения объектива характеризуется значениями полихроматических коэффициентов передачи контраста  $T$  (КПК), рассчитанными с помощью требования 40 САРО «Расчет ДЧКХ». Последний термин обозначает расчет дифракционной частотно-контрастной характеристики. Этот термин использовался вместо КПК в 60-е годы прошлого столетия. В таблице 4.25 приведены значения  $T$  для рассчитанного объектива до частоты Найквиста  $N = 185 \text{ мм}^{-1}$ .

Табл. 4.25 Значения полихроматического КПК рассчитанного объектива (смещение плоскости установки  $-0,025$ )

Частота, л/мм	Пучок $\omega = 0$	Пучок $\omega=0,707 \omega_{\max}$		Пучок $\omega=\omega_{\max}$	
		Штрихи паралл. ОУ	Штрихи перпен. ОУ	Штрихи паралл. ОУ	Штрихи перпен. ОУ
0	1	1	1	1	1
19	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
37	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
56	0,87	0,85	0,86	0,86	0,86
74	0,82	0,80	0,80	0,81	0,81
93	0,78	0,75	0,76	0,76	0,76
111	0,74	0,69	0,71	0,71	0,72
130	0,70	0,65	0,66	0,66	0,68
148	0,66	0,60	0,62	0,62	0,64
167	0,62	0,56	0,58	0,57	0,60
185	0,59	0,52	0,55	0,53	0,56

Расчет КПК по требованию 20 программы САРО дает для частоты 185 л/мм для края поля: для  $\lambda_0 = 546,07 \text{ нм}$   $T_0 = 0,51$ , для  $\lambda_1 = 435,8 \text{ нм}$   $T_1 = 0,28$ , для  $\lambda_2 = 450 \text{ нм}$   $T_2 = 0,29$ , для  $\lambda_3 = 480 \text{ нм}$   $T_3 = 0,48$ , для  $\lambda_4 = 520 \text{ нм}$   $T_4 = 0,54$ , для  $\lambda_5 = 587 \text{ нм}$   $T_5 = 0,46$ , для  $\lambda_6 = 643,8 \text{ нм}$   $T_6 = 0,38$ .

Сравним разрешающую способность полученного объектива с разрешающей способностью объектива Таир – 3. Для Таира – 3 фотографическая разрешающая способность 45 л/мм в центре поля и 38 л/мм на краю поля (с учетом свойств фотоматериала). Опытным путем установлено, что фотографической разрешающей способности соответствует контраст 0,05. В пространстве предметов величинам 45 л/мм и 38 л/мм будет соответствовать разрешающая способность в угловой мере 15" и 18" соответственно.

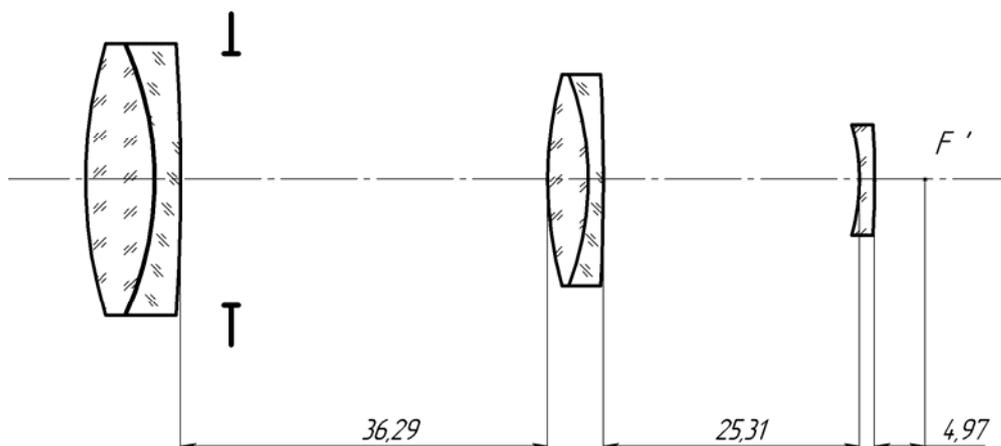


Рис. 4.22 Объектив типа Петцваля с линзой Смита

Определим пространственную частоту при контрасте 0,05 в нашем случае. Для этого рассчитаем ЧКХ для частоты  $N = 2A'/\lambda = 730$  л/мм. Контрасту 0,05 соответствует частота 600 л/мм для осевого пучка и примерно 550 л/мм для крайнего пучка, что в пространстве предметов составляет 5,5" и 6". Таким образом, разрешающая способность увеличилась примерно в 3 раза.

Допустимая дисторсия [23] для фотографических объективов составляет 4,5 %. В представленном объективе дисторсия составляет примерно 0,4%.

#### 4.9 Расчет систем для работы в ИК области спектра

Инфракрасное излучение занимает протяженную область спектра, примыкающую, с одной стороны, к видимому (красному) излучению, а с другой стороны – к электромагнитным колебаниям радиодиапазона. Инфракрасную область спектра принято делить на три – четыре основных поддиапазона:

Ближний .....	0,76 – 3 мкм
Средний .....	3 – 6 мкм
Дальний .....	6 – 15 мкм

При разработке оптических систем для ИК диапазона в первую очередь необходимо учитывать возможности использования оптических

материалов, обладающих достаточной прозрачностью в данной области спектра.

Для работы в ближней ИК области спектра, которая используется в частности в приборах ночного видения (ПНВ), когда наибольшая длина волны не превышает 2,6 мкм, могут применяться обычные бесцветные оптические стекла. Однако в диапазоне 1 – 1,8 мкм подавляющее большинство оптических бесцветных стекол имеет практически одинаковый коэффициент дисперсии, равный примерно  $v_{1,4} \approx 50$ , что исключает возможность коррекции хроматизма. Только сочетание особых стекол ОК1 и ОФ4 позволяют исправить хроматизм в этой области спектра, поскольку у ОК1  $v_{1,4} = 75,62$ , а у ОФ4  $v_{1,4} = 41,83$ . Еще лучшие результаты могут быть получены при замене стекла ОК1 на флюорит, имеющий коэффициент дисперсии  $v_{1,4} = 105,63$ .

В области спектра 2 – 2,6 мкм у обычных бесцветных стекол наблюдается существенные различия в коэффициентах дисперсии, причем характерно, что коэффициенты дисперсий флинтгов становятся больше таковых у кронов. Так у стекла К8  $v_{2,3} = 47,04$ , а у стекла ТФ4  $v_{2,3} = 78,01$ . Сочетание особых кронов с особыми флинтами, а именно ОК1 с ОФ4 по-прежнему дает отличный результат, поскольку для стекла ОК1 коэффициент дисперсии  $v_{2,3} = 82,2$ , а у стекла ОФ4  $v_{2,3} = 40,85$ .

Приведенные данные показывают, что с применением обычных стекол исключается возможность создания ахроматических оптических систем, работающих в широкой области спектра, включая видимую и ближнюю инфракрасную. Используя особые стекла ОК1 и ОФ4 или флюорит, принципиально возможно создать ахроматы от видимой области спектра до длины волны 2,6 мкм. Вторичный спектр при этом достигает весьма большого значения:  $C^{**} = - 2,2 \cdot 10^{-3}$ . Ахромат для области 1 – 1,8 мкм обладает коэффициентом вторичного спектра  $C^{**} = - 4,2 \cdot 10^{-4}$ , а для области спектра 2 – 2,6 мкм  $C^{**} = - 4 \cdot 10^{-4}$ .

В дальней ИК области спектра земная атмосфера имеет два окна прозрачности: 3 – 5 мкм и 8 – 12 мкм. Эти спектральные диапазоны используются главным образом для тепловидения. Количество материалов, обладающих малым поглощением излучения в этих диапазонах и хорошими физико-химическими свойствами, крайне ограничено. В особенности это относится ко второму, длинноволновому диапазону.

Оптические константы основных материалов, используемых для области спектра 3 – 5 мкм, приведены в таблице 4.26. За основную длину волны принята  $\lambda_0 = 4$  мкм. Дополнительные длины волн  $\lambda_1 = 5$  мкм и  $\lambda_2 = 3$  мкм. Хорошие результаты в отношении вторичного спектра дает сочетание флюорита с фтористым литием. Эта пара материалов предпочтительна и с технологических позиций, так как они оба прозрачны и в видимой области спектра, что упрощает центрировку линз. Германий с

кремнием дают несколько больший вторичный спектр, составляющий  $C^{**} = 0,16 \cdot 10^{-3}$ .

Таблица 4.26 Материалы для области спектра 3 – 5 мкм

Материал	$n_0$	$\nu_0$	$p$
Флюорит $CaF_2$	1,40966	21,68	0,4349
Фтористый литий $LiF$	1,34942	8,74	0,4296
Германий $Ge$	4,02453	101,9	0,6959
Кремний $Si$	3,42550	239,0	0,6739
Селенид цинка $ZnSe$	2,43410	192,5	0,5584

Для работы в дальней ИК области спектра 8 – 14 мкм, которая используется в частности в тепловизионных приборах, наиболее часто используется германий, обладающий непривычно большим показателем преломления и малой дисперсией. По этой причине в качестве объективов в некоторых случаях могут использоваться и одиночные линзы [2].

Оптические константы основных материалов, используемых в дальнем диапазоне ИК спектра с длинами волн 8 – 14 мкм, приведены в таблице 4.27. Здесь на основную длину волны принята  $\lambda_0 = 10,6$  мкм, соответствующая длине волны  $CO_2$  – лазера. Коэффициент дисперсии  $\nu_0 = (n_0 - 1)/(n_8 - n_{14})$ , относительная частная дисперсия  $p = (n_8 - n_0)/(n_8 - n_{14})$ .

Таблица 4.27 Материалы для области спектра 8 – 14 мкм

Материал	$n_0$	$\nu_0$	$p$
ИКС25	2,76563	93,27	0,6181
ИКС29	2,59822	74,65	0,6231
Германий $Ge$	4,00203	938,1	1,3125
Селенид цинка $ZnSe$	2,40553	33,07	0,6666

Наиболее часто используется сочетание германия с селенидом цинка. При этом относительная оптическая сила положительной линзы из германия, обеспечивающая ахроматизацию, близка к единице и составляет всего лишь 1,037, а относительная оптическая сила отрицательной линзы из селенида цинка – 0,037. Вторичный спектр при этом достигает  $C^{**} = 0,7 \cdot 10^{-4}$ . Небольшие относительные оптические силы линз наряду с большими показателями преломления позволяют получить высокое качество изображения при высокой светосиле.

Использовать апланатические поверхности при синтезе систем из кремния и германия, для которых  $s = r \cdot (n + n')/n$  затруднительно, так как большие значения показателей преломления приводят к слишком малым значениям радиусов кривизны. В основу расчета оптических систем для

ИК-области спектра могут быть положены методы Г.Г. Слюсарева. Ниже приведена методика синтеза и представлен объектив, используемый для тепловизионного прибора.

Первоначально производится габаритный расчет системы таким образом, что

$$\sum_i \varphi_i / n_i = 0,$$

где  $\varphi_i$  – оптическая сила  $i$ -ого из  $k$  компонентов системы,  $n_i$  – показатель преломления  $i$ -ого компонента, что обеспечивает исправление кривизны изображения.

Если при этом для каждого компонента исправить сферическую aberrацию и кому, то есть выполнить условия  $P_i = W_i = 0$ , то кроме очевидных условий  $S_I = S_{II} = S_{IV} = 0$  оказывается исправлен и астигматизм, то есть  $S_{III} = 0$ . При этом нет необходимости в составлении и решении уравнений, связывающих суммы Зейделя с конструктивными параметрами оптической системы.

В видимой области спектра компонент, обладающий  $P_i = W_i = 0$ , может быть реализован в виде склеенной линзы. Для ИК области спектра использование склеенных линз недопустимо из-за отсутствия клея, прозрачного в нужной области, поэтому, как следует из теории aberrаций третьего порядка, наиболее простым компонентом в этом случае может служить одиночная линза с одной асферической поверхностью. Однако расчеты показывают, что деформация асферической поверхности оказывается, как правило, весьма малой, а линзы без асферических поверхностей обладают малыми остаточными aberrациями.

Расчеты [24, 25] показали, что для разных материалов существуют диапазоны значений линейного увеличения  $V$  компонентов, где для выполнения условия  $P_i = W_i = 0$  можно использовать линзы без асферической поверхности, так как в пределах этих интервалов величины  $P_i$  и  $W_i$  практически равны нулю. Например, для линзы из германия при увеличении  $V = -20 \dots 0,25$  и от 4,5 до 20 параметры  $P_i$  и  $W_i$  достаточно малы.

В табл. 4.28 представлены конструктивные параметры [24], а на рис. 4.23 – схема объектива, рассчитанного на основе изложенных методик:  $f' = 38$ , диафрагменное число  $K = 1$ , угловое поле  $2\omega = 25^\circ$ , рабочий диапазон спектра 8 – 9 мкм.

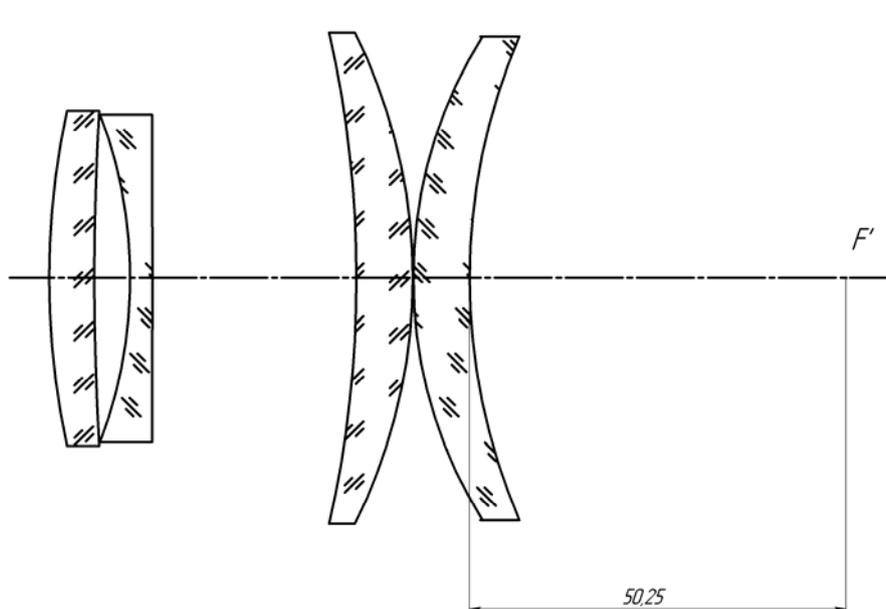
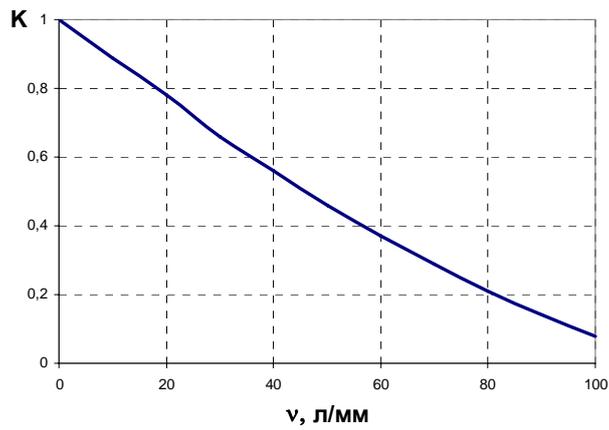


Рис. 4.23 Схема объектива  $f' = 38$ ,  $K = 1$ ,  $2\omega = 25^\circ$   
для области спектра 8 – 9 мкм

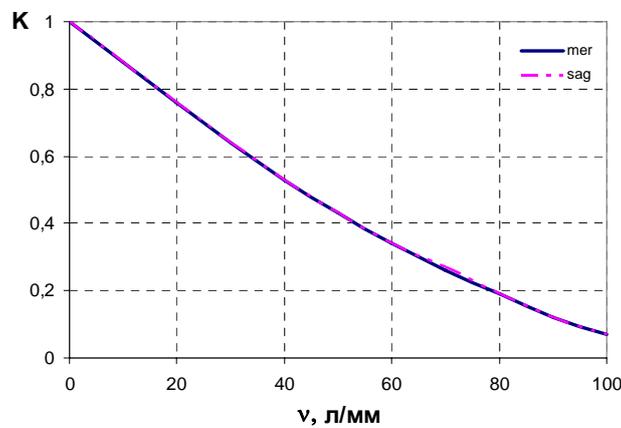
Табл. 4. 28 Конструктивные параметры объектива  $f' = 38$ ,  $K = 1$ ,  $2\omega = 25^\circ$

Радиусы	Толщины	Марки стекол
108,070	6	1
378,616	4,75	Кремний
-62,694	3	1
-8626,426	27,24	Кремний
-150,429	7,5	1
-74,472	0,1	Кремний
61,998	7,5	1
82,702		Кремний
		1

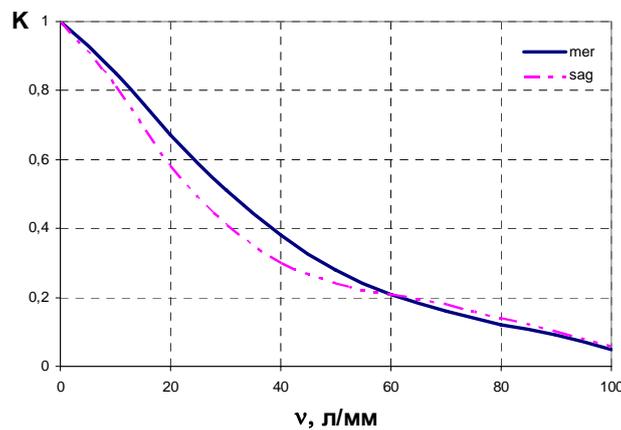
На рис. 4.24 представлены графики ЧКХ объектива для трех точек поля.



а



б



в

Рис. 4.24 Графики ЧКХ объектива  $f' = 38$ ,  $K = 1$ ,  $2\omega = 25^\circ$   
 для области спектра 8 – 9 мкм: а) для осевой точки поля  
 б) для поля  $\omega = 0,707\omega_{max}$  в) для поля  $\omega = \omega_{max}$

Для представленного объектива для точки поля  $\omega = 0,707\omega_{max}$  графики меридиональной и сагиттальной ЧКХ практически совпадают.

## **Заключение**

В пособии изложены современные компьютерные методы и приемы проектирования и расчета оптических систем. Основная цель этих методов – сведение к минимуму ручной работы с помощью формул и калькулятора. Приведенные методики проиллюстрированы на численных примерах, выполненных с помощью системы автоматизированного расчета оптики САРО, для которой приведены сведения, дополняющие имеющиеся инструкции.

Исследованы сферическая абберация пятого порядка и сферохроматическая абберация тонких компонентов часто встречающихся типов. Приведены величины вторичного спектра для двухлинзовых и трехлинзовых компонентов ахроматов и апохроматов. Приведены методики расчета двухлинзовых и трехлинзовых компонентов. Приложен каталог современных окуляров зрительных труб, приведены их абберации и конструктивные параметры. Изучен эффект абберационного виньетирования в окулярах, обусловленный наличием комы в зрачках, связанной с дисторсией. Изложен новый метод оптимальной коррекции сферической абберации зрительных труб Кеплера, а также методика подбора пар стекол, обеспечивающих оптимальную коррекцию сферической абберации системы Галилея.

На примере расчета объектива Петцваля с линзой Смита показана перспективность сочетания методик расчета оптических систем по Г.Г.Слюсареву и М.М. Русинову.

## Литература

1. Запрыгаева Л.А., Свешникова И.С. Расчет и проектирование оптических систем. М. Логос, 2000, 581с.
2. Вычислительная оптика. Справочник под общ.ред. М.М. Русинова. Изд.3-е. М., Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009
3. Сокольский М.Н. Допуски и качество оптического изображения. Л. Машиностроение, 1989.- 221 с.: ил.
4. Мальцев М.Д. Расчет допусков на оптические детали. М., Машиностроение, 1974, 168с.
5. Леонова В.Б. Автоматизация расчетов оптических систем. М., Машиностроение, 1970
6. Грамматин А.П. Методы синтеза оптических систем. Учебное пособие. СПб., СПб ГИТМО (ТУ), 2002.
7. Грамматин А.П., Романова Г.Э. Цыганок Е.А. Компьютерное моделирование при изучении дисциплин, связанных с расчетом оптических систем. Методические указания к лабораторным работам, СПб.: СПбГУИТМО, 2011. 111с.
8. Грамматин А.П., Романова Г.Э. Цыганок Е.А. Компьютерное моделирование при изучении дисциплин, связанных с расчетом оптических систем Оптический журнал. - 2012. - Т. 79. - № 5. с.65-69
9. Панов В.А., Андреев Л.Н. Оптика микроскопов. Расчет и проектирование Л., Машиностроение, 1976. – 432 с.
10. Методы расчета и проектирование оптических систем. Л., Машиностроение, 1970. – 256с.
11. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. Л., Машиностроение, 1937.
12. Русинов М.М. Композиция оптических систем. М.: Либроком, 2011
13. Грамматин А.П. Синтез оптических систем, состоящих из линз с апланатическими и изопланатическими поверхностями и бесконечно тонких компонентов //Труды ГОИ т.49, вып.183, 1981. – с.23
14. Грамматин А.П., Демидова Е.А. Аберрационные свойства оптических систем из конфокальных поверхностей ОЖ, т. 72, №2, 2005 г., с. 19 – 23.
15. Грамматин А.П. Автоматизация проектирования оптических систем. Учебное пособие. Л., ЛИТМО, 1989, 80с.
16. Грамматин А.П. Использование углов первого параксиального луча с осью в качестве коррекционных параметров. Труды ЛИТМО «Вопросы научного приборостроения» Л., 1980
17. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем, Л.: Машиностроение, 1975.
18. Трубка С.В. Расчет двухлинзовых склеенных объективов, Л.: Машиностроение, 1984. 93с.
19. Балащенко О.Н., Грамматин А.П. «Объективы-апохроматы без кристаллов», Оптический журнал, 2002г., т.69, №2, с.21-24

20. Волосов Д.М. Фотографическая оптика. Издательство «Искусство», 1971. – 671с.
21. Фотокинетика. Энциклопедия. Гл. ред. Е.А.Иофис. Издательство «Советская энциклопедия», М., 1981
22. Грамматин А.П., Романова Г.Э. Методы проектирования оптических систем. Автоматизация проектирования оптических систем. Методические указания к лабораторным работам, СПб.: СПбГУИТМО(ТУ), 2008. – 60с.
23. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов. М.-Л., Машиностроение, 1966. –564 с.
24. Чан Куок Туан Разработка и исследование линзовых объективов для тепловизионных систем. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2008
25. Грамматин А.П., Чан К.Т., Методика построения исходных систем для тепловизионных линзовых объективов // Оптический журнал, 2008, Т.79, №7 сс. 30 – 34.

**ПРИЛОЖЕНИЕ I****Конструктивные параметры некоторых окуляров**

Конструктивные параметры окуляров приводятся в обратном ходе.

**Окуляр Эрфле**

$$f' = 15,6071, D = 4 \text{ мм}, 2\omega = 56^\circ, z_p = -12,93$$

#	КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ						
	ПОВ	РАДИУСЫ	D	МАРКИ СТЕКЛОЛ	ПОКАЗАТ. ПРЕЛОМЛ.	СВЕТОВЫЕ ДИАМЕТРЫ	СТРЕЛКИ
					1.000000		
1		-340.400	2.00	ТФ4	1.746231	17.96	-.12
2		52.970	8.00	СТКЗ	1.662240	19.75	.93
3		-17.989	.10		1.000000	21.90	-3.72
4		66.070	4.00	СТКЗ	1.662240	22.49	.96
5		-66.070	.10		1.000000	22.36	-.95
6		28.910	10.00	СТКЗ	1.662240	21.31	2.03
7		-12.794	2.00	ТФ4	1.746231	19.54	-4.54
8		41.880	5.89		1.000000	17.05	.88
9		.000			1.000000	15.81	.00

**Окуляр ГОИ**

$$f' = 15,23, D = 3,8 \text{ мм}, 2\omega = 60^\circ, z_p = -13,4$$

#	КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ						
	ПОВ	РАДИУСЫ	D	МАРКИ СТЕКЛОЛ	ПОКАЗАТ. ПРЕЛОМЛ.	СВЕТОВЫЕ ДИАМЕТРЫ	СТРЕЛКИ
					1.000000		
1		-16.190	1.90	ТФ4	1.746231	17.03	-2.42
2		-66.370	6.50	ТК16	1.615192	21.16	-.85
3		-13.804	.10		1.000000	22.84	-6.05
4		.000	4.00	ТК16	1.615192	26.44	.00
5		-34.670	.10		1.000000	26.90	-2.71
6		34.670	4.00	ТК16	1.615192	27.24	2.79
7		.000	.10		1.000000	26.90	.00
8		18.793	10.00	ТК16	1.615192	24.76	4.65
9		-24.770	1.90	ТФ4	1.746231	22.36	-2.67
10		16.190	6.44		1.000000	17.45	2.55
11		.000			1.000000	16.70	.00

**Окуляр Русинова**

$$f' = 24,88, D = 5 \text{ мм}, 2\omega = 72^\circ, z_p = -20,23$$

КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ						
#	РАДИУСЫ	D	МАРКИ СТЕКОЛ	ПОКАЗАТ. ПРЕЛОМЛ.	СВЕТОВЫЕ ДИАМЕТРЫ	СТРЕЛКИ
				1.000000		
1	.000	7.50	СТК19	1.747647	34.52	.00
2	-39.142	.10		1.000000	36.64	-4.55
3	.000	3.00	ТФ4	1.746231	38.90	.00
4	26.112	18.50	СТК19	1.747647	42.77	11.12
5	-46.484	.10		1.000000	43.30	-5.35
6	40.002	9.00	СТК19	1.747647	39.71	5.28
7	.000	4.30		1.000000	37.27	.00
8	-45.250	3.00	ТФ4	1.746231	36.74	-3.90
9	.000	6.83		1.000000	35.66	.00
10	.000			1.000000	34.05	.00

**Окуляр ЛИТМО**

$$f' = 25,024, D = 4 \text{ мм}, 2\omega = 70^\circ, z_p = -19,54$$

КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ						
#	РАДИУСЫ	D	МАРКИ СТЕКОЛ	ПОКАЗАТ. ПРЕЛОМЛ.	СВЕТОВЫЕ ДИАМЕТРЫ	СТРЕЛКИ
				1.000000		
1	.000	7.00	СТК19	1.747647	30.35	.00
2	-37.760	2.50	ТФ12	1.792371	32.65	-3.71
3	49.200	10.50	СТК19	1.747647	40.02	4.25
4	-50.700	.10		1.000000	41.40	-4.42
5	-338.800	8.50	СТК19	1.747647	43.92	-.71
6	-44.360	.10		1.000000	45.22	-6.19
7	38.730	8.50	СТК19	1.747647	43.75	6.77
8	.000	8.90		1.000000	42.67	.00
9	-50.700	2.50	ТФ10	1.813769	35.80	-3.27
10	.000	6.96		1.000000	34.83	.00
11	.000			1.000000	32.80	.00

**Трофейный окуляр**

$$f' = 25,055, D = 3,52 \text{ мм}, 2\omega = 80^\circ, z_p = -15,73$$

КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ						
#	РАДИУСЫ	D	МАРКИ СТЕКОЛ	ПОКАЗАТ. ПРЕЛОМЛ.	СВЕТОВЫЕ ДИАМЕТРЫ	СТРЕЛКИ
				1.000000		
1	.000	10.68	БК8	1.548860	34.48	.00
2	-16.430A	.26		1.000000	35.49	-9.58
3	63.096	11.61	ТК23	1.591477	40.52	3.34
4	-40.876	2.41	ТФ4	1.746231	40.46	-5.36
5	31.794	17.54	БК10	1.571311	41.63	7.76
6	-38.086	5.39		1.000000	42.58	-6.51
7	.000			1.000000	38.88	.00

**Широкоугольный окуляр**

$$f' = 25, D = 5 \text{ мм}, 2\omega = 90^\circ, z_p = -19,41$$

#	КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ						
	ПОВ	РАДИУСЫ	D	МАРКИ СТЕКОЛ	ПОКАЗАТ. ПРЕЛОМЛ.	СВЕТОВЫЕ ДИАМЕТРЫ	СТРЕЛКИ
					1.000000		
1		.000	3.00	Ф1	1.616878	46.57	.00
2		90.160	24.50	ТК16	1.615192	53.48	4.06
3		-29.640А	.10		1.000000	59.09	-14.72
4		66.680	5.00	ТФ4	1.746231	71.16	10.29
5		43.450	22.00	К8	1.518296	68.09	16.45
6		-155.600	.10		1.000000	68.14	-3.78
7		114.550	15.00	К8	1.518296	66.44	4.92
8		-314.100	8.00		1.000000	63.64	-1.62
9		.000	20.75		1.000000	57.53	.00
10		-70.470	3.00	К8	1.518296	48.79	-4.36
11		33.420	27.00	Ф4	1.628472	48.35	10.35
12		-33.420	3.00	К8	1.518296	47.29	-9.80
13		70.470			1.000000	42.03	3.21

**Окуляр с удаленным зрачком**

$$f' = 25,065, D = 3 \text{ мм}, 2\omega = 50^\circ, z_p = -33,57$$

#	КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ						
	ПОВ	РАДИУСЫ	D	МАРКИ СТЕКОЛ	ПОКАЗАТ. ПРЕЛОМЛ.	СВЕТОВЫЕ ДИАМЕТРЫ	СТРЕЛКИ
					1.000000		
1		.000	7.00	СТК19	1.747647	34.20	.00
2		-36.980	.30		1.000000	35.44	-4.52
3		65.770	3.20	ТФ10	1.813769	36.13	2.53
4		36.640	7.00	СТК19	1.747647	35.10	4.48
5		.000	.30		1.000000	34.67	.00
6		29.240	14.00	СТК19	1.747647	33.04	5.12
7		-23.770	3.20	ТФ10	1.813769	30.66	-5.61
8		23.770	7.61		1.000000	23.47	3.10
9		.000			1.000000	22.56	.00

## Приложение II

### Обозначения, принятые в программном комплексе САРО

$A_0$  – угол первого параксиального луча с осью до оптической системы.

$HA$  – высота первого параксиального луча на первой поверхности.

Когда предмет на бесконечности  $A_0 = 0$ ,  $HA = f'$  (если система задана углами первого параксиального луча). Предмет на конечном расстоянии  $A_0 = 1$ ,  $HA = s$ .

$B_0$  – угол второго параксиального луча до оптической системы.

$HB$  – высота второго параксиального луча на первой поверхности системы.

Если входной зрачок на бесконечности  $B_0 = 0$ ,  $HB = 1$ . Если входной зрачок на конечном расстоянии  $B_0 = 1$ ,  $HB = z_p$ . Распространенный случай  $B_0 = 1$ ,  $HB = 0$ , то есть зрачок совпадает с первой поверхностью системы.

Материалы в программе САРО могут быть заданы как буквенными обозначениями, так и кодами:

Тип стекла	Код
ЛК	14
К	10
БК	12
ТК	11
СТК	13
ФК	16
КФ	15
БФ	22
ЛФ	24
Ф	20
ТФ	21
ОФ	25
ТБФ	26
СТФ	23

Среда	Код
Воздух	1
Вода при 20°C	3
Физиол.раствор	3001
Вазел.масло	3002
Кедр. масло	3003
Метилениодид	3004
Желатина	3005
Фтористый литий	3006
Флюорит	3007
Квасцы	3008
Стекло кварц.	3009
Фтористый барий	3011
Хлористый калий	3012
Натрий хлор	3013
Кварц кристаллический	3014
Кремний	3016
Сапфир	3017
Лейкосапфир	3018
Селенид цинка	3019
Германий	3020

Код марки стекла образуется путем приписывания к коду типа стекла порядкового номера стекла внутри типа. Например, К8 – 1008, К20 – 1020, СТК3 – 1303 и т.д.

## Требование 2.1

**ТАБЛ. 1 ПАРАКСИАЛЬНЫЙ ПУЧОК №0, ПАРАКСИАЛЬНЫЕ ЛУЧИ №0. ДЛИНЫ ВОЛН (0), (1), (2). ПРОДОЛЖЕНИЕ ТАБ. 1: НАЖАТЬ 9 НА МАЛОЙ КЛАВИАТУРЕ**

S0	Z0	Z'0(0)	S'0(0)	F'(0)	VЗР(0)	S'A	S'0(1-0)	S'0(2-0)	S'0(2-1)	Z'0
0		-283.2	146.29	1000.0	0.4295	146.29	-0.018903	0.040880	0.059783	-28

**ТАБЛ. 2 ОСЕВОЙ ПУЧОК №0**

ЛУЧИ	ПРОДОЛЖЕНИЕ: НАЖАТЬ 9 НА МАЛОЙ КЛАВИАТУРЕ									
MU=0	H	ДС'(0)	TGC'	Y'(0)	W(0)	ЭТА %	Y'(1-0)	Y'(2-0)	Y'(2-1)	ДС'(1)
№1	100.	0.122	0.100	0.0122	-0.0011	-0.0015	0.00262	-0.737-3	-0.00336	0.148
№2	86.6	0.0218	0.0869	0.00190	-0.157	0.00353	0.00116	0.000555	-0.601-3	0.0351
№3	70.7	-0.0306	0.0709	-0.0022	-0.138	0.00539	0.000112	0.00134	0.00123	-0.0291
№4	50.0	-0.0373	0.0501	-0.0019	-0.0510	0.00418	-0.457-3	0.00152	0.00198	-0.0465

**ТАБЛ. 3**

**ПУЧКИ ГЛАВНЫЕ ЛУЧИ ПРОДОЛЖЕНИЕ: НАЖАТЬ 9 НА МАЛОЙ КЛАВИАТУРЕ**

MU	Z	Z'	TGC'	Y'(0)	ДИС	Z'M	Z'S	Z'M-Z'S	Y'(1-0)	Y'(2-0)	
3	0.0154	0	-280.1	-0.0363	15.5	0.0301	-0.0133	-0.0033	-0.00998	0.268-4	-0.162-3
1	0.0218	0	-276.9	-0.0518	21.9	0.0872	0.593-3	0.641-3	-0.476-4	-0.822-4	-0.109-3

**ТАБЛ. 4**

**ШИРОКИЙ НАКЛОННЫЙ МЕРИДИОНАЛЬНЫЙ ПУЧОК №1. ПРОДОЛЖЕНИЕ: 9 НА МАЛОЙ КЛАВИАТУРЕ**

MU	H	TGC'	ДТGC'	ДУ'	W(0)	Y'(1-0)	Y'(2-0)	Y'(2-1)	ДУ'(1)
0.0218	100.	ПРЕВЫШАЕТ СВД: ПОВЕРХ. 5							ПРЕВЫШАЕТ СВД:
86.6		ПРЕВЫШАЕТ СВД: ПОВЕРХ. 7							ПРЕВЫШАЕТ СВД:
70.7		0.0181	0.0699	0.883-3	0.0942	0.000997	0.000230	-0.767-3	0.00188
50.0		-0.0024	0.0494	0.00113	0.0568	-0.763-4	0.000937	0.00101	0.00106
-50.0		-0.102	-0.0498	0.00401	-0.137	0.000925	-0.00222	-0.00315	0.00493
-70.7		-0.122	-0.0707	0.00270	-0.286	0.000879	-0.00260	-0.00348	0.00358
-86.6		-0.138	-0.0867	-0.0069	-0.253	0.000355	-0.00236	-0.00272	-0.0065
-100.		-0.152	-0.100	-0.0269	0.127	-0.593-3	-0.00162	-0.00103	-0.0275

**ТАБЛ. 5**

**ШИРОКИЙ НАКЛОННЫЙ САГИТТАЛЬНЫЙ ПУЧОК №1. ПРОДОЛЖЕНИЕ: 9 НА МАЛОЙ КЛАВИАТУРЕ**

MU	M	TGC'	TGD'	ДХ'	W(0)	ДУ'	X'(1-0)	X'(2-0)	X'(2-1)	Y'(1-0)
0.0218	100.	-0.0520	0.100	0.0132	0.0436	0.368-3	0.00251	-0.609-3	-0.00312	0.00059
86.6		-0.0520	0.0866	0.00252	-0.131	0.00132	0.00105	0.000671	-0.380-3	0.00042
70.7		-0.0519	0.0706	-0.0018	-0.125	0.00156	0.222-4	0.00144	0.00142	0.00025
50.0		-0.0518	0.0499	-0.0017	-0.0473	0.00111	-0.523-3	0.00159	0.00212	0.858-

### Для параксиального пучка (Табл. 1)

$S_0$  – расстояние предмета от первой поверхности, при отсутствии цифры в графе – предмет на бесконечности.

$Z_0$  – расстояние входного зрачка от первой поверхности. При отсутствии цифры в графе – зрачок на бесконечности.

$Z'_0(0)$  – положение выходного зрачка для основной длины волны относительно последней поверхности.

$S'_0(0)$  – положение плоскости изображения (плоскости Гаусса) от последней поверхности.

$F'(0)$  – фокусное расстояние для основной длины волны.

$VЗР(0)$  – линейное увеличение в зрачках для основной длины волны.

$S'A$  – положение плоскости установки от последней поверхности. При отсутствии таковой  $S'A = S'_0(0)$ .

$S'_0(1-0)$  – расстояние между плоскостями Гаусса для первой дополнительной и основной длинами волн.

$S'_0(2-0)$  – расстояние между плоскостями Гаусса для второй дополнительной и основной длинами волн.

$S'_0(2-1)$  – расстояние между плоскостями Гаусса для второй и первой дополнительными длинами волн (хроматизм положения).

### Для осевого пучка (табл.2)

$\mu$  –  $(-\sin \omega)$ , где  $2\omega$  – угловое поле в пространстве предметов.

$h$  – координата пересечения луча с плоскостью входного зрачка.

$\Delta S'(0)$  – продольная сферическая aberrация для основной длины волны. Если задана плоскость установки, то отсчет производится от нее, а не от плоскости Гаусса.

$\text{TGC}'$  –  $\text{tg}\sigma'$ , где  $\sigma'$  – угол между оптической осью и меридиональным лучом в пространстве изображений.

$Y'(0)$  – поперечная сферическая aberrация для основной длины волны.

$W_0(0)$  – волновая сферическая aberrация для основной длины волны.

ЭТА % – отступление от условия изопланатизма в процентах.

$Y'(1-0) = Y'(1) - Y'(0)$ , где  $Y'(1)$  – координата пересечения луча первой дополнительной длины волны с плоскостью, расположенной на расстоянии  $S'A$  от последней поверхности.

$Y'(2-0) = Y'(2) - Y'(0)$ , где  $Y'(2)$  – координата пересечения луча второй дополнительной длины волны с плоскостью, расположенной на расстоянии  $S'A$  от последней поверхности.

### Для главных лучей (табл. 3)

$z$  – расстояние точки пересечения главного луча с осью от первой поверхности в пространстве предметов. Если входной зрачок (апертурная диафрагма) расположен в пространстве предметов, то  $z = z_0$ .

$z'$  – расстояние точки пересечения главного луча с осью от последней поверхности в пространстве изображений.

$\text{TGC}'$  – тангенс угла, образованного между осью и главным лучом в пространстве изображений.

$Y'(0)$  – координата точки пересечения главного луча с плоскостью Гаусса (или плоскостью установки, если таковая задана).

ДИС – дисторсия.

$z'_M$  – расстояние меридионального астигматического фокуса от плоскости Гаусса (или от плоскости установки, если таковая задана).

$z'_S$  – расстояние сагиттального астигматического фокуса от плоскости Гаусса (или от плоскости установки, если таковая задана).

$Y'(1-0)$  – разность координат точек пересечения главных лучей первой дополнительной и основной длин волн с плоскостью Гаусса (с плоскостью установки).

$Y'(2-0)$  – разность координат точек пересечения главных лучей второй дополнительной и основной длин волн с плоскостью Гаусса (с плоскостью установки).

#### Для широкого наклонного меридионального пучка (табл. 4)

$\text{TGC}'$  – тангенс угла, образованного меридиональным лучом с координатой на входном зрачке  $H$ , и осью в пространстве изображений.

$\text{dY}'$  – разность координат точек пересечения данного луча и главного луча с плоскостью Гаусса (плоскостью установки).

$w$  – волновая абберрация для данного луча.

$Y' (1-0)$  – то же, что и для осевого пучка.

$Y' (2-0)$  – то же, что и для осевого пучка.

$Y' (2-1)$  – поперечная хроматическая абберрация для данного луча.

$\text{dY}' (1)$  – разность координат точек пересечения данного луча и главного луча первой дополнительной длины волны с плоскостью Гаусса основной длины волны (плоскостью установки).

#### Для широкого наклонного сагиттального пучка лучей (табл.5)

$m$  – координата по оси  $OX$  точки пересечения внемеридионального луча с плоскостью входного зрачка.

$\text{TGC}'$  – тангенс угла между оптической осью и проекцией луча на меридиональную плоскость.

$\text{TGD}'$  – тангенс угла между проекцией луча на меридиональную плоскость и самим лучом.

$\text{dX}'$  – абберрация луча в сагиттальном направлении (вдоль оси координат  $OX$ ).

$w$  – волновая абберрация луча.

$\text{dY}'$  – абберрация луча в меридиональном направлении (вдоль оси координат  $OY$ ).

$X' (1-0)$  – разность координат по оси  $OX$  точек пересечения лучей первой дополнительной и основной длин волн.

$X' (2-0)$  – разность координат по оси  $OX$  точек пересечения лучей второй дополнительной и основной длин волн.

$X' (2-1)$  – разность координат по оси  $OX$  точек пересечения лучей второй и первой дополнительных длин волн с плоскостью Гаусса (плоскостью установки).

$Y' (1-0)$  – разность координат по оси  $OY$  точек пересечения лучей первой дополнительной и основной длин волн с плоскостью Гаусса (плоскостью установки).

$Y' (2-0)$  – аналогично  $X' (2-0)$ , вдоль  $OY$

$Y' (2-1)$  – аналогично  $X' (2-1)$ , вдоль  $OY$

#### Расположение некоторых рассчитываемых характеристик в САРО

1. Фокусное расстояние –  $F' (0)$  в Табл.1.

2. Положение плоскости Гаусса относительно последней поверхности –  $S' 0 (0)$  в Табл.1.

3. Продольная сферическая aberrация –  $\Delta S' (0)$  в Табл. 2.
4. Поперечная сферическая aberrация –  $\Delta Y' (0)$  в Табл. 2.
5. Хроматизм положения –  $S' 0 (2-1)$  в Табл. 1.
6. Отступление от условия изопланатизма –  $\Delta \eta \%$  в Табл. 2.
7. Поперечная хроматическая aberrация для осевой точки –  $\Delta Y' (2-1)$  в Табл. 2.
8. Меридиональная составляющая астигматизма –  $Z' M$  в Табл. 3.
9. Сагиттальная составляющая астигматизма –  $Z' S$  в Табл. 3.
10. Хроматизм увеличения –  $\Delta Y' (2-1)$  в продолжении Табл. 3.
11. Дисторсия –  $\Delta \text{дис}$  в Табл. 3.
12. Поперечная aberrация для широкого наклонного меридионального пучка лучей –  $\Delta Y'$  в Табл. 4.
13. Поперечная aberrация в сагиттальном сечении для широкого сагиттального пучка лучей –  $\Delta X'$  в Табл. 4.
14. Поперечная aberrация в меридиональном сечении для широкого сагиттального пучка лучей –  $\Delta Y'$  в Табл. 4.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

---

## **КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ**

Кафедра прикладной и компьютерной оптики является одной из крупнейших кафедр российских ВУЗов, занимающихся задачами современной оптической науки.

Кафедра возникла при слиянии двух кафедр оптического факультета: теории оптических приборов и кафедры оптических приборов и компьютерной оптики. На кафедре обучают специалистов, имеющих самое широкое представление об оптике в целом – от проектирования оптических систем самого разного назначения до компьютерной обработки изображений и интерферограмм.

Овладение такими разнообразными знаниями невозможно без практической работы с приборами, и кафедра имеет в своем составе несколько учебно-исследовательских лабораторий.

В лаборатории оптических измерений и контрольно-измерительных приборов студенты получают знания и навыки в области метрологии, учатся измерять характеристики оптических систем и параметры деталей и материалов.

Лаборатория микроскопов и медицинских оптических приборов знакомит с различными типами микроскопов (поляризационными, биологическими, металлографическими), методами наблюдения микрообъектов и т.п., а также с приборами, применяемыми офтальмологами для диагностики зрения.

Лаборатория геодезических приборов позволяет получить начальные навыки работы с теодолитами, дальномерами другими

приборами, применяемыми в геодезии и картографии, узнать особенности проектирования различных их узлов и конструкции.

В лабораториях компьютерных средств контроля оптики и исследования качества оптического изображения занимаются проблемами контроля качества оптических поверхностей оптической системы в целом, а также компьютеризации и автоматизации этих процессов.

Достижения кафедры отмечены двумя Ленинскими премиями, пятью Государственными премиями, премией Совета Министров, премией французской Академии Наук. Кроме того, работы, выполненные на кафедре, отмечались многочисленными медалями и дипломами международных и российских выставок, медалями С.П.Королева, Ю.А.Гагарина, премиями Минвуза.

За период существования кафедры было подготовлено более 150 кандидатов наук, из них 30 иностранцев, а также 16 докторов наук. Большинство научных и производственных подразделений в области прикладной оптики в России, а также многие в США, Израиле и Китае возглавляют ученики нашей научной школы.

В настоящее время кафедра Прикладной и Компьютерной Оптике факультета Оптико-Информационных Систем и Технологий является одним из крупнейших подразделений Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, ориентированным на выпуск высококвалифицированных специалистов в области оптотехники.

С информацией о кафедре можно ознакомиться на сайте:  
**[aco.ifmo.ru](http://aco.ifmo.ru)**

Грамматин Александр Пантелеймонович  
Романова Галина Эдуардовна  
Балащенко Ольга Николаевна

## **Расчет и автоматизация проектирования оптических систем**

**Учебное пособие**

В авторской редакции  
Редакционно-издательский отдел НИУ ИТМО  
Зав. РИО  
Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99  
Подписано к печати  
Заказ №  
Тираж  
Отпечатано на ризографе

Н.Ф. Гусарова

**Редакционно-издательский отдел**  
Санкт-Петербургского национального  
исследовательского университета  
информационных технологий, механики  
и оптики  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

