

**Белорусский национальный технический университет**

**Приборостроительный факультет**

**Кафедра «Лазерная техника и технология»**

СОГЛАСОВАНО

Заведующий кафедрой «Лазерная  
техника и технология»

\_\_\_\_\_ Н.В.Кулешов  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

СОГЛАСОВАНО

Декан Приборостроительного  
факультета

\_\_\_\_\_ А.М. Маляревич  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
«Техническая оптика»**

для специальности

1-38 01 02 Оптико-электронные и лазерные приборы и системы  
(специализация 1-38 01 02 01 Оптические и  
оптико-электронные приборы и комплексы)

Составитель: профессор кафедры «Лазерная техника и технология»  
Н.К. Артюхина, доктор технических наук, доцент

Рассмотрено и утверждено на заседании совета Приборостроительного фа-  
культета 30.11.2015, протокол №3

## **Перечень материалов**

1. Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) в виде файла PDF (PortableDocumentFormat).
2. Установочный файл студенческой версии программы VisSim 3.0.

## **Пояснительная записка**

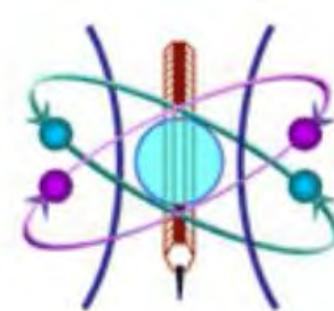
ЭУМК предназначен для самостоятельного изучения дисциплины «Техническая оптика» студентами приборостроительных специальностей, для которых техническая оптика и расчет оптических систем не являются профилем обучения. ЭУМК может быть использован преподавателями сходных дисциплин для подготовки к лекциям и организации лабораторных и практических занятий.

В состав ЭУМК входят следующие разделы: теоретический (базовый конспект лекций), практический (лабораторный практикум, вопросы для практических занятий, курсового проектирования), контроля знаний (перечень экзаменационных вопросов и вопросов к зачету), вспомогательный (выдержки из учебно-программной документации).

Лабораторный практикум основан на использовании компьютерного пакета прикладных программ синтеза и анализа оптических систем OPAL (VisualSolutions, Inc., США, студенческая версия распространяется бесплатно). Практикум предназначен для самостоятельной проработки отдельных тем курса и является теоретической основой выполнения курсовых работ по дисциплине.

Файлы ЭУМК находятся на CD-диске и могут использоваться непосредственно с диска или после копирования на другие носители.

Белорусский национальный технический университет  
Приборостроительный факультет  
Кафедра «Лазерная техника и технология»



## ТЕХНИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Электронный учебно-методический комплекс

### РАЗДЕЛЫ ЭУМК

- |                        |                          |
|------------------------|--------------------------|
| 1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ | 2 ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ    |
| 3 КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ      | 4 ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ |
- 2016

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

## СОДЕРЖАНИЕ БАЗОВОГО КОНСПЕКТА ЛЕКЦИЙ

РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	9
1.МОНОХРОМАТИЧЕСКИЕ АБЕРРАЦИИ: ФИГУРЫ РАССЕЯНИЯ И ГРАФИКИ .....	9
1.1.Связь между волновыми и геометрическими aberrациями .....	9
1.2. Анализ aberrаций наклонного пучка.....	12
1.2.1. Волновая aberrация астигматизма.....	12
1.2.2. Волновая aberrация комы .....	14
1.3. Сферическая aberrация III и V порядков .....	18
1.4. Определение aberrационных составляющих по графикам поперечных aberrаций .....	20
1.5. Выбор начальных данных для расчета хода лучей. Параметры внеосевых пучков .....	22
2. ХРОМАТИЗМ И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЕКОЛ.....	24
2.1. Условия нормировки .....	24
2.2. Хроматизм положения.....	25
2.3. Ахроматизация.....	27
2.4. Вторичный спектр .....	28
2.5. Хроматизм увеличения.....	29
2.6. Характеристики бесцветных оптических стёкол.....	31
2.7. Оптические характеристики материалов для инфракрасной области спектра .....	33
3. АБЕРРАЦИОННЫЕ ПОЛИНОМЫ .....	35
3.1. Основные формулы разложения Зейделя .....	35
3.2. Преобразованные коэффициенты .....	37
3.3. Монохроматические aberrации третьего порядка .....	38
4. МЕТОДЫ КОРРЕКЦИИ АБЕРРАЦИЙ .....	40
4.1. Метод проб.....	40
4.2. Алгебраический метод .....	40
4.3. Комбинированный метод .....	41

4.4. Метод автоматической оптимизации.....	42
4.5. Композиционный метод.....	43
<b>5. КОМПЬЮТЕРНЫЕ ПРОГРАММЫ АНАЛИЗА.....</b>	<b>44</b>
5.1. Процедура «анализ».....	44
5.2. Программное обеспечение.....	44
<b>6. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....</b>	<b>47</b>
6.1. Исходные принципы оценки качества изображения.....	47
6.2. Разрешающая способность оптических систем.....	50
6.3. Влияние аберраций на разрешающую способность.....	52
6.4. Качественные параметры оценки качества изображения.....	53
6.5. Волновые критерии оценки качества изображения.....	55
6.6. Частотно-контрастная характеристика.....	58
6.7. Точечная диаграмма лучей.....	61
6.8. Функция рассеяния линии и пятно рассеяния.....	62
<b>РАЗДЕЛ 2. СИНТЕЗ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....</b>	<b>65</b>
<b>7. ТЕОРИЯ КОЛЛЕНИАРНОСТИ И ОПТИКА ГАУССА ВДОЛЬ ГЛАВНОГО ЛУЧА.....</b>	<b>65</b>
7.1. Главные фокусные расстояния.....	65
7.2. Угловое увеличение. Узловые фокусные расстояния.....	65
7.3. Инвариант Лагранжа-Гельмгольца.....	67
7.4. Меридиональный и сагиттальный инварианты Гульстранда–Юнга.....	67
7.5. Анастигматические поверхности.....	69
<b>8. БАЗОВЫЕ (СИЛОВЫЕ) ЭЛЕМЕНТЫ.....</b>	<b>70</b>
8.1. Основные базовые элементы.....	70
8.2. Коррекционно-силовые элементы оптических систем.....	72
<b>9. КОРРЕКЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ.....</b>	<b>75</b>
9.1. Компенсаторы зеркально-линзовых систем.....	75
9.2. Аномальные и нормальные склейки. Ориентация и использование склеек для коррекции астигматизма.....	78
9.3. Апланатические поверхности, биопланатические линзы.....	81
9.3.1. Апланатические точки.....	82

9.3.2. Биопланатическая линза.....	83
<b>РАЗДЕЛ 3. КОМПОЗИЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ.....</b>	<b>85</b>
<b>10. СВЕТОСИЛЬНЫЕ ОБЪЕКТИВЫ.....</b>	<b>85</b>
10.1. Двойные склеенные анастигматы.....	85
10.2. Двойные четырехлинзовые анастигматы.....	86
10.3.Объективы типа «Плазмат», «Гелиос», Петцваля.....	90
<b>11. ШИРОКОУГОЛЬНЫЕ ОБЪЕКТИВЫ.....</b>	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
11.1.Широкоугольные зеркально-линзовые объективы.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
11.2.Широкоугольный объектив “Лиар”.....	93
11.3. Объектив Руссар.....	95
<b>12. МИКРООБЪЕКТИВЫ.....</b>	<b>96</b>
12.1. Особенности и методы расчета микрообъективов.....	96
12.2. Анализ композиций оптических систем микрообъективов.....	97
12.3. Зеркально-линзовые микрообъективы.....	100
<b>13. ЗЕРКАЛЬНЫЕ И ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫЕ ОБЪЕКТИВЫ.....</b>	<b>102</b>
13.1. Назначение и схемы построения зеркально-линзовых объективов.....	102
13.2. Менисковые системы.....	103
13.3. Устранение паразитного света блендами в схеме «Менискового Кассегрена».....	106
13.4. Зеркально-линзовая система с мениском Максудова.....	107
13.5. Система Шмидта.....	109
13.6. Зеркально-линзовый объектив типа МТО.....	112
13.7. Системы В.Н. Чуриловского.....	113
13.8. Рефлексоруссары.....	114
<b>14. НЕТРАДИЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И СИСТЕМЫ.....</b>	<b>118</b>
14.1. Линза Френеля.....	118
14.2. Растровые системы.....	120
14.3. Градиентная оптика.....	121
14.4. Киноформы.....	123
14.5. Конические аксиконы.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Целью изучения дисциплины «Техническая оптика» является обучение принципам проектирования оптических систем с повышенными оптическими характеристиками, вопросов выбора исходной системы для абберационного расчета и оценки качества изображения с помощью ПЭВМ.

Для изучения данной дисциплины студенты предварительно должны усвоить курс физики (раздел оптика: дифракция света, поляризация света, дисперсия света, геометрическая оптика), курс математики (дифференциальное и интегральное исчисление, степенные ряды, векторная алгебра, графоаналитическая геометрия), прикладную математику (основы программирования, методы программной реализации кибернетических моделей). В основе дисциплины лежат базисные положения оптотехники и знания по расчёту оптических систем, полученные при изучении дисциплины «Теория и расчет оптических систем», которая определяет мировоззренческий фундамент, логические и мотивационные основы системного восприятия настоящей дисциплины.

Дисциплина «Техническая оптика» является частью подготовки инженера по приборостроению специальности 1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы» по специализации «Оптические и электронные приборы и комплексы». Эта дисциплина – одна из основных при подготовке специалистов в области проектирования, расчета и конструирования оптических приборов.

Знания и умения, полученные студентами при изучении данной дисциплины, необходимы для освоения последующих дисциплин специализаций, связанных с проектированием оптико-электронных приборов и комплексов, таких как: «Оптические измерения», «Сборка и юстировка оптических приборов», «Методы контроля параметров оптических систем», «Проектирование оптико-электронных приборов», «Специальные вопросы оптического приборостроения».

В результате освоения дисциплины «Техническая оптика» студент должен:

*знать:*

- основы композиции оптических систем;
- методы выбора исходной системы для абберационной коррекции;
- классификацию базовых и коррекционных элементов;
- теорию синтеза базовой системы и коррекционных элементов;

*уметь:*

- использовать имеющуюся оптическую расчетную базу (ГОСТы, архивы оптических систем, справочники, патенты и изобретения);
- пользоваться программами анализа и синтеза компьютерных пакетов по расчету оптических систем;
- оценивать качество изображения по каталогам оптических систем;
- проводить комплектовку оптической схемы и суммировать aberrации отдельных элементов.

Основными методами (технологиями) обучения, отвечающими целям изучения дисциплины «Техническая оптика», являются элементы проблемного изложения, реализуемые на лекционных занятиях; элементы учебно-исследовательской деятельности и реализация творческого подхода, реализуемые на практических занятиях, лабораторных работах и при самостоятельной работе студентов; проектные технологии, используемые при проектировании конкретного объекта, реализуемые при выполнении курсовой работы.

# РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

## 1. МОНОХРОМАТИЧЕСКИЕ АБЕРРАЦИИ: ФИГУРЫ РАССЕЙЯНИЯ И ГРАФИКИ

### 1.1.Связь между волновыми и геометрическими aberrациями

В идеальном случае волновые поверхности в пространстве изображений восстанавливают сферическую форму, тогда выходящие пучки лучей будут гомоцентрическими. Реально этого нет. Нарушение гомоцентричности пучков лучей – геометрические aberrации ОС. Отступления реальной волновой поверхности от сферы сравнения – волновые aberrации.

Выражения для волновых и геометрических aberrаций могут быть представлены функцией переменных (линейных  $m$  и  $M$  координат по входному зрачку, соответствующих апертурным углам  $\sigma_t$  и  $\sigma_s$ ) и имеют связь друг с другом. Оценку качества изображения (к примеру, по частотно-контрастным характеристикам ЧКХ) нельзя проводить без расчета волновых aberrаций.

Разложение волновой aberrации можно представить непрерывной и дифференцируемой функцией по отношению к главному лучу для широкого внеосевого пучка с апертурными углами  $\sigma_t$  и  $\sigma_s$ :

$$\Delta l = \Delta l(\sigma_t, \sigma_s). \quad (1.1)$$

Сфера сравнения выбирается так, чтобы она пересекала главный луч в вершине волновой поверхности и касалась волновой поверхности (первый постоянный  $\Delta l = \Delta l_0$  и член разложения, где  $\sigma_t$  в 1-ой степени, могут быть исключены). При этом разложение волновой aberrации можно начать с членов 2-й степени:

$$\Delta l = A'_t \sigma_t^2 + B' \sigma_t \sigma_s + A'_s \sigma_s^2 + A''_t \sigma_t^3 + B'' \sigma_t^2 \sigma_s + C'' \sigma_t \sigma_s^2 + D'' \sigma_s^3 + A'''_t \sigma_t^4 + B''' \sigma_t^3 \sigma_s + C''' \sigma_t^2 \sigma_s^2 + D''' \sigma_t \sigma_s^3 + A''''_t \sigma_t^4 + \dots \quad (1.2)$$

При симметрии относительно меридиональной плоскости углы  $\sigma_s$  входят в разложение в четных степенях, имеем:

$$\Delta l = A'_t \sigma_t^2 + A'_s \sigma_s^2 + A''_t \sigma_t^3 + C'' \sigma_t \sigma_s^2 + A'''_t \sigma_t^4 + C''' \sigma_t^2 \sigma_s^2 + A''''_s \sigma_s^4 + \dots \quad (1.3)$$

Выделим три группы членов разложения, которые характеризуют aberrации 1-го, 2-го и 3-го порядков по отношению к апертурным углам наклонного пучка лучей:

Первая  $\Delta l_I = A'_t \sigma_t^2 + A'_s \sigma_s^2$  выражает астигматизм;

вторая  $\Delta l_{II} = A''_t \sigma_t^3 + C'' \sigma_t \sigma_s^2$  – кому;

третья  $A'''_t \sigma_t^4 + C''' \sigma_t^2 \sigma_s^2 + A'''_s \sigma_s^4 = \Delta l_{III}$  – сложную сферическую aberrацию.

В разложение (1.3) не входят aberrации: дисторсия и кривизна поля; но их отсутствие не влияет на рассмотрение структуры наклонного пучка, так как они лишь перемещают изображение точки в пространстве.

На участке волновой поверхности с уравнением  $z=f(x, y)$ , ограниченным координатными плоскостями  $ZOY$  и  $ZOX$  ( $OZ$  – оптическая ось), зададим точку  $M$  волновой поверхности с координатами  $x_1, y_1, z_1$ . Соединив точку  $M$  с началом координат, получим прямую  $MO$ , на которой отложим радиус  $R$  сферы сравнения; при наличии волновой aberrации  $\Delta l$  она определит расстояние между сферой сравнения и волновой поверхностью.

Центр сферы сравнения совмещён с началом координат, нормаль к волновой поверхности пересекает плоскость  $XOY$  в точке  $M_0$  с координатами  $z_0=0, x_0$  и  $y_0$ .

Волновая aberrация  $\Delta l$

$$\Delta l = R - \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}.$$

С учетом малости величины волновой aberrации имеем:

$$R^2 - 2R\Delta l = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 \quad (1.4)$$

Продифференцировав уравнение (1.4) в частных производных от волновой aberrации по  $x$  и по  $y$ , и, считая текущую координату  $Z=0$ , а  $x$  и  $y$  координатами  $x_0$  и  $y_0$ , имеем:

$$x_0 = z_1 \frac{\partial f}{\partial x} + x_1; \quad y_0 = z_1 \frac{\partial f}{\partial y} + y_1$$

$$x_0 = -R \frac{\partial \Delta l}{\partial x} = \delta G'; \quad y_0 = -R \frac{\partial \Delta l}{\partial y} = \delta g'$$

Величины  $x_0$  и  $y_0$  можно рассматривать как *поперечные aberrации*, определенные в плоскости, перпендикулярной к главному лучу. Главный луч имеет с оптической осью полевой угол  $\omega'$ , меридиональная составляющая поперечной aberrации в плоскости, перпендикулярной оси, будет равна

$$\overline{\delta g'} = \frac{\delta g'}{\cos \omega'} = -\frac{R \partial \Delta l}{\cos \omega' \partial y} \quad (1.5)$$

Величина же сагиттальной составляющей остается неизменной:

$$\overline{\delta G'} = \delta G' = -\frac{R \partial \Delta l}{\partial x} \quad (1.6)$$

От прямоугольных координат можно перейти к апертурным углам:  $\sigma_x \approx \frac{x}{R}$ ;  $\sigma_y \approx \frac{y}{R}$ .

Дифференцируя последние выражения, получаем:

$$\partial x = R \partial \sigma_x; \partial y = R \partial \sigma_y. \quad (1.7)$$

что позволяет привести формулы (1.5) и (1.6) к виду:

$$\overline{\delta g'} = -\frac{\partial \Delta l}{\partial \sigma_y} \cdot \frac{1}{\cos \omega'}; \overline{\delta G'} = -\frac{\partial \Delta l}{\partial \sigma_x} \quad (1.8)$$

При оценке качества изображения телескопических систем, дающих изображение, расположенное в бесконечности, вместо величин поперечных aberrаций пользуются aberrациями угловыми; их величину можно получить, определяя углы  $\gamma_x$  и  $\gamma_y$  как отношения поперечных aberrаций к радиусу сферы сравнения:

$$\begin{aligned} tg \gamma_x = \gamma_x &= \frac{\delta g'}{R} = -\frac{\partial \Delta l}{\partial x} \\ tg \gamma_y = \gamma_y &= \frac{\delta G'}{R} = -\frac{\partial \Delta l}{\partial y} \end{aligned} \quad (1.9)$$

## 1.2. Анализ aberrаций наклонного пучка

### 1.2.1. Волновая aberrация астигматизма

Величины поперечных aberrаций в плоскости, перпендикулярной главному лучу, находим, дифференцируя формулу волновой aberrации астигматизма:

$$\Delta l_l = A'_t \sigma_t^2 + A'_s \sigma_s^2 \quad (1.10)$$

Имеем поперечные составляющие:

$$-\delta'_g = 2A'_t \sigma_t;$$

$$-\delta'_G = 2A'_s \sigma_s.$$

Для продольного астигматизма:

$$z_t = \frac{\delta'_g}{\sigma_t} = -2A'_t;$$

$$z_s = \frac{\delta'_G}{\sigma_s} = -2A'_s.$$

*Характерные случаи астигматизма.*

1.  $A'_t = A'_s = A'$

Волновая aberrация  $\Delta l = A' \sigma^2$ , где  $\sigma^2 = \sigma_t^2 + \sigma_s^2$ ;  $\delta'_g = -2A'_t \sigma_t$ ;  $\delta'_G = -2A'_s \sigma_s$ .

Возводя величины  $\delta'_g$  и  $\delta'_G$  в квадрат и складывая друг с другом, получаем:

$$(\delta'_g)^2 + (\delta'_G)^2 = 4A'^2 \sigma^2 = (\delta'_{g0})^2 = const$$

Фигура рассеяния – окружность. Следовательно, поперечные aberrации при расфокусировке сохраняют центрированность изображения точки.

2.  $A'_s = 0$ ;  $A'_t \neq 0$ .  $\Delta l = A'_t \sigma_t^2$ .

Поперечные aberrации выразятся для этого случая уравнениями:

$$-\delta'_g = 2A'_t \sigma_t$$

$$-\delta'_G = 0$$

Волновая aberrация вдоль меридионального фронта – парабола второго порядка от апертурного угла  $\sigma_t$ , независимо от угла  $\sigma_s$ , поэтому равным значениям угла  $\sigma_t$  будут соответствовать и равные значения волновой aberrации (рис. 1.3).

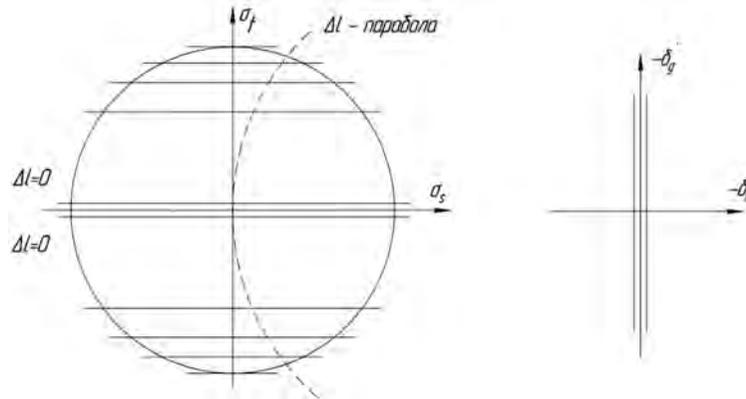


Рис. 1.3. Волновые и поперечные aberrации для астигматизма при совмещении плоскости наводки с сагиттальным изображением

Фигура рассеяния – отрезок прямой вдоль меридиональной плоскости, начало и конец которого располагаются на равных расстояниях по обе стороны от начала координат.

В случае  $A'_t = 0$ ;  $A'_s \neq 0$  имеем аналогичную картину, повернутую на  $90^\circ$ .

3.  $A'_t = -A'_s$ . Выражение для волновой aberrации

$$\Delta l = A'_t \sigma_t^2 + A'_s \sigma_s^2 (\sigma_t^2 - \sigma_s^2)$$

Поперечные aberrации:

$$-\delta'_g = 2A'_t \sigma_t$$

$$-\delta'_G = 2A'_s \sigma_s$$

Кривые волновых aberrаций (рис. 1.4) вдоль меридионального и сагиттального фронта:

$$\Delta l_t = A'_t \sigma_t^2$$

$$\Delta l_s = A'_s \sigma_s^2$$

В этом случае фигура рассеяния является окружностью (при круговом обходе лучом по контуру зрачка движение по окружности фигуры будет происходить в обратном направлении к движению луча по контуру выходного зрачка).

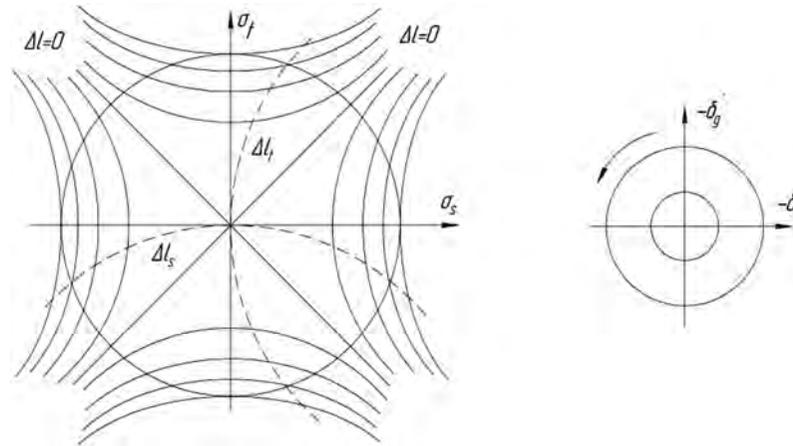


Рис. 1.4. Волновые и поперечные aberrации для астигматизма при размещении плоскости наводки между сагиттальным и меридиональным изображениями

Кривые равных волновых aberrаций – гиперболы, расположенные между двумя асимптотами (под углом  $45^\circ$ ). Кривая волновой aberrации вдоль меридионального фронта – парабола.

### 1.2.2. Волновая aberrация комы

Выражение для комы в волновой форме:

$$\Delta \ell_{II} = A_t'' \sigma_t^3 + C'' \sigma_t \sigma_s^2 \quad (1.11)$$

Составляющие поперечной aberrации комы:

$$\begin{cases} -\delta_g' = 3A_t''\sigma_t^2 + C''\sigma_s^2 \\ -\delta_G' = 2C''\sigma_t\sigma_s \end{cases} \quad (1.12)$$

Откуда следует, что при  $\sigma_s = 0$ , волновая кома вдоль сагиттального фронта будет отсутствовать.

На рис.1.5 дан график изменения коэффициентов  $A_t''$  и  $C''$  по углу поля зрения  $\omega$ . Вблизи оси системы коэффициенты  $A_t''$  и  $C''$  равны; кривые совпадают, т.к. существует один независимый коэффициент комы, через который выражается сагиттальная и меридиональная кома.

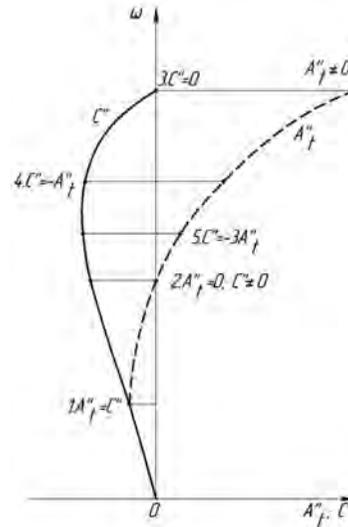


Рис. 1.5. Картина изменения коэффициентов комы по полю зрения

Характерные случаи комы:

1.  $A_t'' = C''$ .
2.  $A_t'' = 0$ ;  $C'' \neq 0$ .
3.  $A_t'' \neq 0$ ;  $C'' = 0$ .

1.  $A_t'' = C''$ , характерно для небольших полей зрения. Выражение для волновой аберрации:

$$\Delta l_{II} = A_t''(\sigma_t^2 + \sigma_s^2)\sigma_t \quad (1.11, a)$$

для поперечных aberrаций:

$$\begin{cases} -\delta_g' = A_t''(3\sigma_t^2 + \sigma_s^2) \\ -\delta_G' = 2A_t''\sigma_t\sigma_s \end{cases} \quad (1.12, a)$$

Картина меридионального волнового фронта представлена на рис. 1.6. При  $\sigma_s = 0$  кривая волновой aberrации вдоль меридионального фронта – кубическая парабола (3-й степени)  $\Delta l_{II} = A_t''\sigma_t^3$ .

Вычисление кривых равных волновых aberrаций по уравнению для заданной волновой aberrации относительно апертурного угла  $\sigma_s$  проводится по формуле:

$$\sigma_s = \pm \sqrt{\frac{\Delta l_{II}}{A_t''\sigma_t} - \sigma_t^2} \quad (1.13)$$

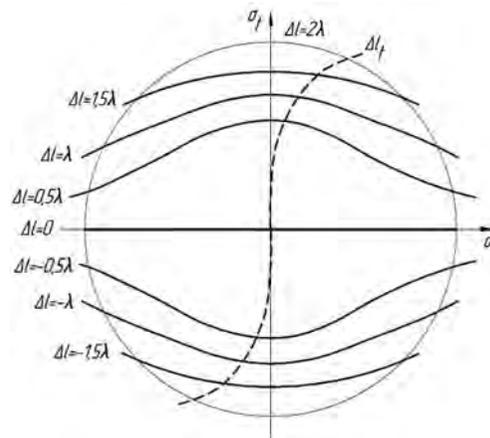


Рис. 1.6. Простая кома. Волновая aberrация

Эти кривые отличаются по знаку и симметричны относительно сагиттального волнового фронта; при увеличении угла  $\sigma_s$  асимптотически приближаются к оси абсцисс и больше расходятся в центральной части зрачка, что выгодно, когда зрачок по  $M$  сечению имеет меньший диаметр, чем в  $S$  (геометрическое виньетирование).

В полярных координатах имеем  $\sigma_t = \sigma \cos\gamma$ ;  $\sigma_s = \sigma \sin\gamma$ ;  

$$\sigma_t^2 + \sigma_s^2 = \sigma^2$$

Подставляя эти значения в формулу (1.12,a), получаем после некоторых преобразований:

$$\begin{cases} -\delta'_g = A''_t \sigma^2 (2 + \cos 2\gamma) \\ -\delta'_G = A''_t \sigma^2 \sin 2\gamma \end{cases} \quad (1.14)$$

Кривые, по формулам (1.14), описывают окружность с радиусом  $R = A''_t \sigma^2$  со смещением центра, равным  $2A''_t \sigma^2 = 2R$  относительно начала координат.

Фигура рассеяния – окружности с уменьшающимся радиусом (по мере уменьшения  $\sigma$  радиус уменьшается по квадратичному закону). Семейство окружностей ограничено касательными с углом равным  $60^\circ$  (рис. 1.7).

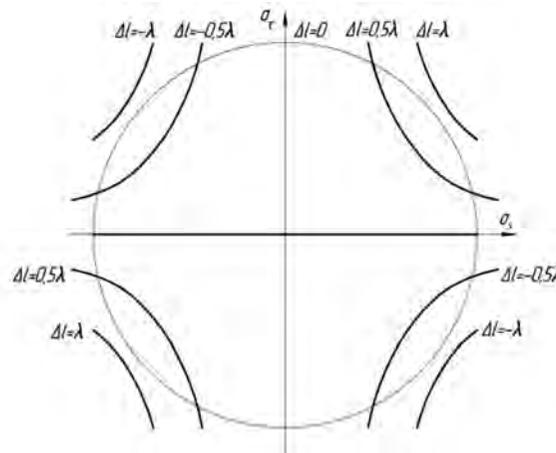
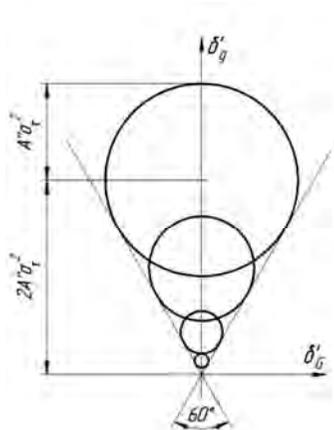


Рис.1.7. Простая кома (поперечные aberrации) Рис.1.8.Кома 2-ой случай (волновые aberrации)

### Связь комы и неизопланатизма

Сферическая aberrация 3-го порядка определена суммой Зейделя  $S_I$ , а мерой меридиональной комы является сумма  $S_{II}$ . Величина неизопланатизма  $\eta$  характеризует отступление от условия неизопланатизма и используется для расчета меридиональной комы.

$$K_{III} = 3y'\eta, \quad (1.15)$$

где значение  $\eta$  определено равенством  $\eta = \frac{\Delta s'}{s'_{0,P} - s'_0} + \frac{\Delta f'}{f'} = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^2 \sigma' \bar{S}_{II}$ .

### 1.3. Сферическая aberrация III и V порядков

Одним из способов компенсации aberrаций 3-го порядка является введение aberrаций высшего порядка. Рассмотрим этот способ на примере сферической aberrации. *Суммарная волновая aberrация:*

$$\Delta l = \Delta l_{III} + \Delta l_V = A^{III} \sigma^4 + A^V \sigma^6.$$

Поперечные aberrации:

$$-\delta_g = 4A^{III} \sigma^3 + 6A^V \sigma^5 = -\delta'_{gIII} - \delta'_{gV} = \frac{4\Delta l_{III}}{\sigma} + \frac{6\Delta l_V}{\delta}. \quad (1.16)$$

Для продольной сферической aberrации:

$$\Delta s' = \frac{\delta'_g}{\sigma} = \frac{\delta'_{gIII}}{\sigma} + \frac{\delta'_{gV}}{\sigma} = \Delta s'_{III} + \Delta s'_V = -\frac{4\Delta l_{III}}{\sigma^2} - \frac{6\Delta l_V}{\sigma^2}.$$

При рассматривании продольной сферической aberrации обязательно добавляют расфокусировку  $\Delta$  (aberrация 1-ого порядка):

$$\Delta l_I = -\frac{\Delta}{2} \cdot \sigma^2,$$

тогда 
$$\Delta l = \Delta l_I + \Delta l_{III} + \Delta l_V = -\left(\Delta + \frac{\Delta s'_{III}}{2} + \frac{\Delta s'_V}{3}\right) \cdot \frac{\sigma^2}{2}.$$

Выразив величину сферической aberrации через коэффициенты "a" и "b", имеем:  $\Delta s' = a\sigma^2 + b\sigma^4$ .

При коррекции продольной сферической aberrации на оси, обычно добиваются ее устранения для некоторого апертурного угла  $\sigma_0$ :

$$\Delta s' = 0 = a\sigma_0^2 + b\sigma_0^4 = \Delta s'_{III} + \Delta s'_V$$

Условие удовлетворяется при  $\sigma_0 = 0$  и  $\sigma_0 = \sqrt{-\frac{a}{b}} \rightarrow a = -b\sigma_0^2$

Из выражения  $\frac{d\Delta s'}{d\sigma} = 0$ , получаем экстремальные значения:  $\sigma_{\text{extr}} = 0$ ;  $\sigma_{\text{extr}} = \frac{\sqrt{2}}{2}\sigma_0$ , (наибольшая остаточная aberrация будет на зоне).

Для сферической aberrации, когда  $a = -b\sigma_0^2$ , имеем  $\Delta s' = -b\sigma_0^2\sigma^2 + b\sigma^4 = (-\sigma_0^2 + \sigma^2)b\sigma^2$ .

Величина волновой aberrации:  $\Delta a = -b\sigma_0^2 \rightarrow \Delta s' = 0$ ;

$$-\Delta l = -\frac{b}{4}\sigma_0^2\sigma^4 + \frac{b}{6}\sigma^6.$$

На рис. 1.9 представлены графики волновой и геометрической aberrации.

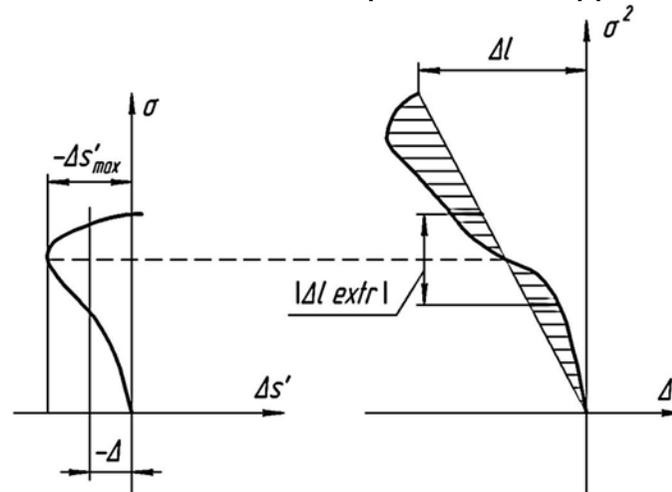


Рис. 1.9. Сферическая aberrация при смещении плоскости аводки

Беря производную по  $\sigma^2$ , имеем  $\sigma_0^2 = \sigma_{max}^2$  (наибольшая волновая aberrация на краю отверстия).

Приравнивая 2-ю производную  $\frac{d^2\Delta l}{d(\sigma)^2}$ , к нулю, найдем, что точка перегиба на кривой волновой aberrации как функции квадрата апертурного угла будет соответствовать точке наибольшей остаточной зоны сферической aberrации. Уменьшение волновой aberrации на краю достигается путем введения расфокусировки  $\Delta$ .

Величина расфокусировки определена формулой

$$\Delta = -\frac{2}{3} \Delta s'_{\max}. \quad (1.17)$$

#### 1.4. Определение aberrационных составляющих по графикам поперечных aberrаций

На рис. 1.10. представлены поперечные aberrации наклонного пучка.

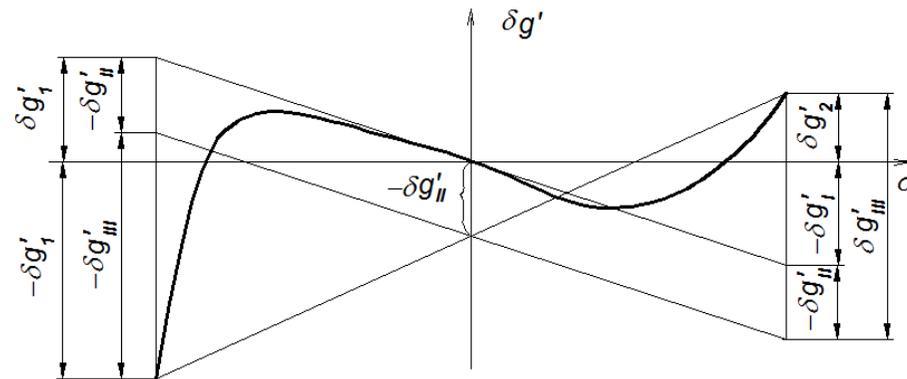


Рис. 1.10. Поперечные aberrации в меридиональной плоскости

Обычно ход лучей широкого наклонного пучка задают, полагая апертурные углы  $\sigma_r$  одной величины, но разных знаков, к примеру,  $\sigma_2 = -\sigma_1$ . Поперечные aberrации для этих углов:

$$\begin{aligned}
-\delta g'_1 &= 2A'_t \sigma_1 + 3A''_t \sigma_1^2 + 4A'''_t \sigma_1^3 \\
-\delta g'_2 &= 2A'_t \sigma_2 + 3A''_t \sigma_2^2 + 4A'''_t \sigma_2^3 \\
-(\delta g'_1 + \delta g'_2) &= 6A''_t \sigma_1^2
\end{aligned}$$

Величина поперечной меридиональной комы:

$$-\delta g'_k = -\frac{\delta g'_1 + \delta g'_2}{2} = 3A''_t \sigma_1^2 \quad (1.18)$$

*Графически* величину комы определяют, соединяя концы меридиональной кривой поперечной аберрации прямой линией; отрезок на оси ординат, отсекаемый этой линией есть величина комы.

Преобразуя формулу (1.18), получим  $\delta g'_2 - \delta g'_1 = 4A'_t \sigma_1 + 8A'''_t \sigma_1^3 = 2(-\delta g'_1 - \delta g'_{III})$ .

$\delta g'_I$  – меридиональная кривизна;  $\delta g'_{III}$  – меридиональная составляющая сферической аберрации в широком внеосевом пучке.

$-\delta g'_1 = 2A'_t \sigma_1$  можно выразить продольной величиной  $Z_t$ , которая определяется вдоль главного луча от меридиональной точки изображения до общей плоскости изображения:

$$Z_t = \frac{\delta g_1}{\sigma_1}. \quad (1.19)$$

Проекция  $Z_t$  на оптическую ось:  $\bar{Z}_t = \frac{\delta g_1}{\sigma_1} \cos \omega'$ , где  $\omega'$  – угол главного луча с оптической осью

$$-\delta g'_{III} = 4A'''_t \sigma_1^3 = \frac{-\delta g'_1 + \delta g'_2}{2} + \frac{\bar{Z}_t}{\cos \omega'} \sigma_1.$$

Величина  $Z_t = \frac{\bar{Z}_t}{\cos \omega'}$  определяется углом между касательной к кривой поперечной аберрации и осью абсцисс.

Строя прямую, параллельную этой касательной через точку, определяющую величину меридиональной комы, по-

лучаем величину меридиональной сферической аберрации как расстояние от этой прямой до концов кривой меридиональной поперечной аберрации ( $-\delta g'_{III}$ ).

Аналогично определяются составляющие поперечных аберраций в сагиттальной плоскости.

### 1.5. Выбор начальных данных для расчета хода лучей. Параметры внеосевых пучков

Цель расчета хода лучей в реальных ОС – определение положения и размера изображения предмета и сравнение его с идеальным изображением. Расчет хода лучей через ОС выполняют, когда известны конструктивные параметры  $r$ ,  $d$ ,  $n$ , а также положение предмета  $S_1$  и его размер (угловой  $\omega$  или линейный  $Y$ ).

Число лучей, ход которых необходимо рассчитать, определяется относительным отверстием:

– для оптической системы с нормальным относительным отверстием ( $D/f' = 1:2,8 - 1:5,6$ ) достаточно рассчитать ход двух лучей: крайнего, имеющего на входном зрачке высоту  $m_{кр}$ , и зонального – высоту

$m_3 = m_{кр} \sqrt{0,5} = 0,707 m_{кр}$  (рис. 1.11); кольцевые зоны входного зрачка, ограниченные высотами крайнего и зонального лучей, равны по площади, поэтому через них поступают одинаковые потоки световой энергии;

– в ОС с несферическими поверхностями при сложном виде меридиональной кривой и в светосильных ОС ( $D/f' = 1:1,5 - 1:2,8$ ) рассчитывают три луча;

– в сверхсветосильных ОС ( $D/f' = 1:1 - 1:1,5$ ) – четыре луча.

Для оценки качества изображения достаточно рассчитать ход ограниченного числа лучей в меридиональной ( $M$ ) и сагиттальной ( $S$ ) плоскостях; в предметной плоскости обычно выделяют осевую точку  $A$  и ряд внеосевых точек  $B_i$ . В осевом пучке рассчитывают лучи, заполняющие верхнюю часть входного зрачка в меридиональной плоскости. Число лучей, ход которых необходимо рассчитать, определяется относительным отверстием. Высоты лучей во входном зрачке определяют из равенства  $m_i = m_{кр} \sqrt{i/2}$ . Для четырех лучей ( $N = 4$ ,  $m_{кр} = m_4$ ) получим  $m_3 = m_4 \sqrt{0,75}$ ;  $m_2 = m_4 \sqrt{0,5}$ ;  $m_1 = m_4 \sqrt{0,25}$ .

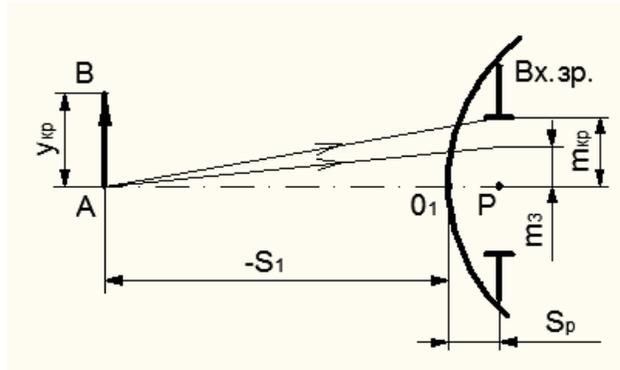


Рис. 1.11. Наборы лучей для расчета через ОС

В оптической системе

- с малыми угловыми полями ( $2\omega = 20 - 30^\circ$ ) можно выполнять расчет для одной внеосевой точки  $B$   $y_1 = y_{кр}$
- для нормальных по полю ОС ( $2\omega = 50 - 60^\circ$ ) – для двух внеосевых точек ( $y_2 = y_{кр}$ ;  $y_1 = 0,5y_2$ );
- для широкоугольных ( $2\omega = 80 - 120^\circ$ ) – для трех внеосевых точек ( $y_3 = y_{кр}$ ;  $y_2 = 0,707y_3$ ;  $y_1 = 0,5y_3$ ).

В наклонных внеосевых пучках ход лучей рассчитывают для одинаковых высот входного зрачка, как в осевом пучке. В меридиональной плоскости выбирают лучи, *симметрично расположенные относительно главного луча* вверх и вниз:  $+m_3, +m_2, +m_1, m_{гл}=0, -m_1, -m_2, -m_3$ . Лучи сагиттального пучка рассчитывают на высотах  $M_i$ , численно равных высотам лучей в меридиональной плоскости для одной из половин зрачка (обычно верхней), симметричной относительно меридиональной плоскости ( $M_3 = m_3$ ;  $M_2 = m_2$ ;  $M_1 = m_1$ ).

## 2. ХРОМАТИЗМ И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЕКОЛ

Причиной возникновения хроматических aberrаций является *дисперсия света*. Это aberrации 1-го порядка; они появляются уже в параксиальной области. К ним относят хроматизм положения и хроматизм увеличения; хроматическ aberrации 3-го порядка относят сферохроматическую aberrацию.

### 2.1. Условия нормировки

*Условия нормировки* задаются в начале расчета. Они определяют начальные координаты для двух параксиальных лучей (рис. 2.1) и описывают важнейшие характеристики ОС: апертуру и поле.

Координаты 1-го параксиального луча, идущего из осевой точки предмета на край входного зрачка:  $-\alpha, h$ , а для 2-го, идущего с края предмета в центр входного зрачка  $-\beta, H$ . На рис. 2.1. представлены лучи с координатами:  $\alpha' = 1, h_1 = \alpha_1 S_1, \beta_1 = 1, S_p = H_1$ .

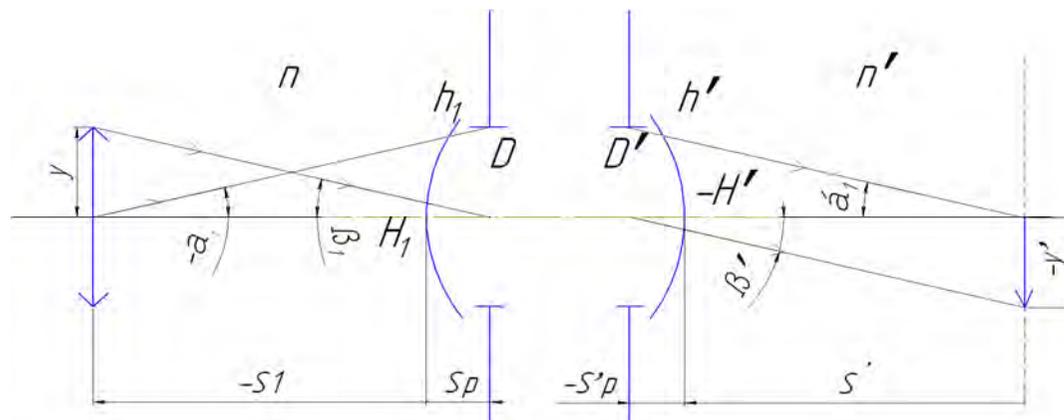


Рис. 2.1. Условия нормировки

## 2.2. Хроматизм положения

Для визуальных оптических систем основная длина волны  $\lambda_0 = 546,1 \text{ нм}$  (линия спектра  $e$ ), рабочий диапазон от  $\lambda_1 = 479,99 \text{ нм}$  (линия  $F'$ ) до  $\lambda_2 = 643,85 \text{ нм}$  (линия  $C'$ ). Для фотосистем и высококачественных объективов микроскопов принято использовать более широкий спектральный диапазон, начиная от  $\lambda_1 = 435,83 \text{ нм}$  (линия  $g$ ).

Хроматизм положения равен разности задних отрезков для соответствующих длин волн:

$$dS'_{\text{XP}} = S'_{\lambda_1} - S'_{\lambda_2}.$$

Для расчета ОС, состоящих из бесконечно тонких линз, разделенных конечными воздушными промежутками, введены **основные параметры** компонентов. Два основных параметра  $P$  и  $W$  описывают монохроматические aberrации. Основными хроматическими параметрами тонкого компонента считаются величины:

- $C^*$  для бесконечно удаленной плоскости предметов ( $\alpha_1 = 0, h_1 = 1, \alpha' = 1$ ),
- $C$  для предмета, находящегося на конечном расстоянии.

Соотношение между ними  $C = (\alpha' - \alpha)C^*$ .

Параметр  $C^*$  зависит только от *внутренних конструктивных элементов компонента*: относительных оптических сил линз компонента и марок стекол этих линз.

$$C^* = \frac{s'_{F'} - s'_{C'}}{f'}. \quad (2.1)$$

где  $s'_{F'} - s'_{C'}$  – хроматизм положения компонента в визуальной области спектра.

Параметр  $C$  зависит также от *внешних элементов*: оптической силы компонента  $\Phi_i$  и от расстояния до плоскости предметов.

Для одиночной линзы основной параметр равен:

$$C^* = \frac{-1}{v_e}. \quad (2.1, a)$$

Для компонента, состоящего из двух склеенных или близко расположенных линз:

$$C^* = -\left[ \frac{\Phi_1}{v_1} + \frac{1-\Phi_1}{v_2} \right]. \quad (2.2)$$

Для любого тонкого компонента сложной ОС (склейка или несколько соприкасающихся тонких линз), обладающего основным параметром  $C^*$ , хроматизм положения:

$$s'_{F'} - s'_{C'} = -\left(\frac{1}{\alpha'}\right)^2 \sum h^2 \cdot \Phi \cdot C^*. \quad (2.3)$$

Общая формула хроматизма положения для системы из  $p$  поверхностей (суммирование до  $p$ ):

$$dS'_{XP} = \frac{1}{n'\alpha'^2} \sum_{k=1}^{k=p} h_k C_k, \quad C_k = \frac{\Delta\alpha_k}{\Delta\frac{1}{n_k}} \Delta\frac{\delta n_k}{n_k}; \quad \text{где } \delta n_k = n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2} - \text{разность показателей для двух длин волн.}$$

Величины  $\alpha$  и  $n$  соответствуют основной длине волны  $\lambda_0$  в заданном спектральном интервале.

Для простой линзы в воздухе имеем

$$C = \frac{\alpha' - \alpha}{1 - n} \delta n = -\frac{n\Phi}{v}, \quad dS'_{XP} = -\frac{1}{\alpha'^2} \cdot \frac{h^2\Phi}{v} = -\frac{S'^2\Phi}{v}, \quad (2.4)$$

Хроматизм положения ОС, состоящей из простых линз, равен (при нормировке  $h_1 = \alpha_1 S'_1$  или  $h_m = \alpha_m S'_m$ ):

$$-\alpha'^2 dS'_{XP} = \frac{h_1^2 \Phi_1}{v_1} + \frac{h_2^2 \Phi_2}{v_2} + \dots + \frac{h_m^2 \Phi_m}{v_m} \quad (2.5)$$

В случае бесконечно удаленной плоскости предметов имеем:

$$dS'_{XP\infty} = f' \sum_{i=1}^{i=m} h_i C_i = f' \sum_{i=1}^{i=m} h_i \Phi_i C_i^*, \quad (2.5, a)$$

где  $f'$  – фокусное расстояние системы; условие нормировки  $\alpha' = 1, h_1 = 1, \sum h_i \Phi_i = 1$ .

Для системы из  $m$  простых линз:

$$dS'_{XP} = -f' \left( \frac{\Phi_1}{v_1} + \frac{h_2^2 \Phi_2}{v_2} + \dots + \frac{h_m^2 \Phi_m}{v_m} \right) \quad (2.5, б)$$

### 2.3. Ахроматизация

Рассмотрим возможность ахроматизации, т.е. устранения хроматизма положения. Ахроматы состоят обычно из двух соприкасающихся (склеенных) линз, одна из которых положительная, а другая отрицательная. *Алгоритмом расчета* является решение системы из двух уравнений:

*первое уравнение* описывает суммарную оптическую силу склеенного (расклеенного) компонента ( $\Phi_1 + \Phi_2 = 1$ , где  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  – оптические силы линз  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ );

*второе уравнение* описывает условие ахроматизации  $dS'_{XP} = 0$ .

Имеем  $\frac{\Phi_1}{v_1} + \frac{1 - \Phi_1}{v_2} = 0$ , откуда следует, что

$$\Phi_1 = \frac{v_1}{v_1 - v_2}. \quad (2.6)$$

Прием ахроматизации основан на введении *хроматических радиусов* в линзах и использовании марок стекол, обладающих близкими значениями показателей преломления для  $\lambda_e$ , но существенно различными коэффициентами дисперсии  $v_e$ . Варьируя радиусами склеиваемых поверхностей, удастся скорректировать хроматические aberrации, почти не изменяя монохроматические aberrации.

Для осуществления ахроматизации, обязательным условием которой является неравенство коэффициентов дисперсии  $v_1 \neq v_2$ , в видимой области спектра разработано большое количество пар стекол, предусмотренных стандартом ГОСТ 3514 – 94. Обычно это кроны, у которых  $v_e \geq 50$ , и флинты ( $v_e \leq 50$ ).

В качестве «хроматических» пар рекомендуют следующие:

СТК19 (СТК9) – ТФ4, ТК16 – Ф1, СТК12 – ТФ8, СТК 7 – ТФ8, ФК24 – ЛФ9, ТК23 – ЛФ9, СТК12 – ТФ4.

Получил распространение прием расчета, при котором на первом этапе осуществляется исправление монохроматических aberrаций, а затем корректируются хроматические aberrации (линзы заменяются склейками).

## 2.4. Вторичный спектр

*Вторичный спектр* рассчитывают для ахроматических ОС. Предмет расположен в бесконечности. Оптическую силу первой линзы  $\Phi_1$  определяют из формулы (2.6), полагая  $C^* = 0$ . Для нахождения параметра  $C^{**}$ , соответствующего вторичному спектру, в формулу (2.2) следует подставить коэффициенты дисперсии  $\nu^*$ , в которых разности показателей преломления  $n_F - n_C$  заменены на разности  $n_F - n_e$ , а величина  $\Phi_1$  взята из формулы (2.4). В результате этих подстановок получаем:

$$C^{**} = -(\nu_1/\nu_1^* - \nu_2/\nu_2^*)/(\nu_1 - \nu_2). \quad (2.7)$$

Отношения  $\nu/\nu^*$  представляют собой относительные частные дисперсии; существует линейная зависимость между относительной частной дисперсией  $p_{F,e}$  и коэффициентом дисперсии  $\nu_e$ , поэтому основной параметр  $C^{**}$ , характеризующий вторичный спектр, равен

$$C^{**} = 0.5702 \times 10^{-3}. \quad (2.8)$$

Вторичный спектр компонента из двух соприкасающихся линз, изготовленных из обычных стекол:

$$s'_F - s'_e = 0.5702 \times 10^{-3} f'. \quad (2.9)$$

Формула (2.9) верна при любом количестве линз, входящих в компонент (предмет в бесконечности).

*Примечание.* Ахромат из стекол ОК1 и ОФ4 для области спектра 1–1.8 мкм обладает коэффициентом вторичного спектра  $C^{**} = -4.2 \cdot 10^{-4}$ , а для области спектра 2–2.6 мкм:  $C^{**} = -4 \cdot 10^{-4}$ . Хорошие результаты в отношении вторичного спектра даёт сочетание флюорита с фтористым литием:  $C^{**} = -0.4 \cdot 10^{-4}$ . Германий с кремнием дают несколько больший вторичный спектр, составляющий  $C^{**} = -0.16 \cdot 10^{-3}$ . Вторичный спектр для сочетания германия с селенидом цинка порядка  $C^{**} = 0.7 \cdot 10^{-4}$ .

Системы с исправленным вторичным спектром называются **апохроматами**.

Конструктивно для устранения вторичного спектра необходимо, чтобы компонент содержал три линзы, выполненные из различных стекол, одно из которых не должно находиться на нормальной прямой.

С этой целью разработаны специальные стекла, которые названы *особыми*: отклонения коэффициентов дисперсий этих стекол от нормальной прямой приводятся в каталогах. Для особых кронов  $\Delta v_e > 0$ , а особых флинтв  $\Delta v_e < 0$ . Наибольшие отклонения имеют стекло ОК1 –  $\Delta v_e = 16.4$  и ОФ6 –  $\Delta v_e = -6.7$ .

Среди новых разработок отметим особый крон ОК 4 ( $v_e = 91.53$ , а  $\Delta v_e = 28.4$ ), который образует идеальную апохроматическую пару – ( $C^{**} = 0.4 \cdot 10^{-5}$ ) со стеклом К8, которое играет роль флинта, т. е. из него выполняется линза с отрицательной оптической силой.

Кроме особых стекол для апохроматов (особенно объективов микроскопов), традиционно используют флюорит ( $\text{CaF}_2$ ), обладающий уникальными оптическими константами, которые располагаются весьма далеко от нормальной прямой ( $v_e = 94.97$ ,  $p_{F,e} = 0.5087$ ,  $\Delta v_e = 35.0$ ), оптическая сила  $\phi_{oc} = 2.71$ . Недостатками флюорита являются малый показатель преломления  $n_e = 1.43496$  и большой коэффициент термического расширения, не позволяющий склеивать флюоритовые линзы с линзами из обычных стекол, при диаметрах больше 10–15 мм. Благодаря большому значению величины  $\Delta v_e$ , использование флюорита даже с обычными стеклами, приводит к существенному уменьшению вторичного спектра. Для ОС из 2-х линз (флюорит и стекло Ф1),  $C^{**} = 0.22 \times 10^{-3}$  вместо соответствующего обычным стеклам  $C^{**} = 0.57 \times 10^{-3}$ . Ещё больший эффект дает сочетание флюорита с особыми флинтами (2-х линзовая ОС из флюорита и ОФ3 обладает параметром  $C^{**} = 0.1 \times 10^{-3}$ ).

Наименьшее значение у комбинации «флюорит–сверхтяжелый крон СТК15» –  $C^{**} = 0.3 \times 10^{-4}$ .

## 2.5. Хроматизм увеличения

Аберрация проявляется в виде разноразмерности параксиальных изображений для двух дополнительных длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  в плоскости Гаусса, соответствующей основной длине волны  $\lambda_0$  (параксиальные лучи длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  пересекают плоскость изображения для длины волны  $\lambda_0$  в разных точках, образуя поперечную хроматическую аберрацию  $y_2' - y_1'$ ).

*Хроматизм увеличения* – это изменение величины изображения за счет изменения угла 2-го параксиального луча  $\beta'$  на величину  $d\beta'$

$$dy' = -s' \cdot d\beta'. \quad (2.10)$$

Задний отрезок  $s' = h/\alpha'$ ; инвариант Лагранжа-Гельмгольца  $J = \alpha \cdot y = \alpha' \cdot y'$ , тогда

$$dy' = y'_{F'} - y'_{C'} = -\frac{h \cdot H \cdot \Phi}{J \cdot v_e} y' . \quad (2.11)$$

Для предмета на бесконечности используется нормировка:  $h_1 = 1, f' = 1, \beta_1 = 1$ , тогда:

$$\frac{dy'}{y'} = \frac{h \cdot H \cdot \Phi}{v_e} . \quad (2.12)$$

Используя хроматический параметр  $C^*$ , получим для группы тонких компонентов:  $\frac{(y'_{F'} - y'_{C'})}{y'} = -h \cdot H \cdot \Phi \cdot C^*$

Для системы, образованной несколькими компонентами

$$\frac{(y'_{F'} - y'_{C'})}{y'} = -\sum h \cdot H \cdot \Phi \cdot C^* . \quad (2.13)$$

Из (2.13) следует, что хроматизм увеличения равен нулю, когда зрачок совпадает с компонентом.

При  $C^* = 0$  устраняются оба вида хроматизма. Следовательно, при ахроматизации каждого из компонентов сложной ОС, достигается одновременное устранение хроматизма положения и увеличения, которое не изменяется при любых подвижках компонентов. Такая ахроматизация называется *стабильной*.

*Графически:*

по результатам расчета строят график сферической аберрации (по горизонтальной оси откладывается величина сферической аберрации, по вертикальной – величина  $10^2 \text{tg} \sigma'$ );

ведется расчет крайних цветных лучей в рабочем диапазоне ( $C \dots F$ );

определяются задние отрезки  $S'_C$  и  $S'_F$ , разность которых характеризует хроматизм положения.

для построения графиков, характеризующих схождение цветных лучей к осевой точке изображения, определяют разности между задними отрезками цветных лучей и отрезком  $S'_{e0}$  для нулевых лучей,

определяют разности  $S'_C - S'_{e0}$  и  $S'_F - S'_{e0}$  для цветных крайних лучей, идущих через край входного зрачка и его зоны;

величины разностей наносятся на график сферической аберрации.

## 2.6. Характеристики бесцветных оптических стёкол

Для изготовления оптических систем применяются различные марки оптических материалов, отличающиеся составом и физическими свойствами.

Обычно все расчеты хода лучей делают для нескольких длин волн из всего спектрального диапазона:

- $\lambda_H, \lambda_B$  – нижняя и верхняя границы спектрального рабочего интервала;
- $\lambda_0$  – основная длина волны.

*Оптическое стекло* характеризуется:

– показателем преломления для различных волн  $n_\lambda$  (основным принят показатель преломления  $n_e$  для длины волны  $\lambda = 546,07$  нм спектральной линии ртути);

– средней дисперсией, равной разности  $n_\lambda$  для определенных длин волн ( $n_i - n_g$  характеризует ближнюю УФ и синюю области спектра;  $n_{F'} - n_{C'}$  и  $n_F - n_C$  видимую, а  $n_r - n_{1013,9}, n_{1013,9} - n_{2249,3}$  ИК область спектра);

– коэффициентом дисперсии  $v_\lambda$  ( $v_\lambda = \frac{n_e - 1}{n_{F'} - n_{C'}}$  – основной коэффициент дисперсии или число Аббе);

– относительной частной дисперсией  $\gamma = \frac{\Delta n}{n_{F'} - n_{C'}}$ , где  $\Delta n$  – частная дисперсия, например,  $n_{F'} - n_e$ ;

относительная частная дисперсия в видимой области  $p_{F',e} = \frac{(n_{F'} - n_e)}{n_{F'} - n_{C'}}$ .

– термооптическими постоянными.

Оптическое стекло характеризуется также оптической однородностью, прозрачностью, твердостью, химической стойкостью и т. д.

*Спектральные характеристики* материалов необходимы для согласования интервалов длин волн пространства предмета и изображения. Оптические стекла условно делят на две группы: кроны и флинтты. Кроны имеют обычно малую дисперсию, а флинтты – высокую. Кроновые стекла имеют большие коэффициенты дисперсии и относительно меньшие показатели преломления по сравнению с флинтами.

Наиболее широко применяемые марки оптического стекла: ЛК – легкий крон, ФК – фосфатный крон, К – крон, БК – баритовый крон, ТК – тяжелый крон, СТК – сверхтяжелый крон, ОК – особый крон, КФ – кронфлинт,

БФ – баритовый флинт, ТБФ – тяжелый баритовый флинт, ЛФ – легкий флинт, Ф – флинт, ТФ – тяжелый флинт, ОФ – особый флинт. Стекла типа ОФ и ОК имеют особый ход относительно частных дисперсий.

Большинство оптических бесцветных стекол прозрачно в диапазоне длин волн  $0.365 - 2.6 \text{ мкм}$  и используется в приборах, работающих в видимой, а также в ближней ИК и УФ областях спектра.

При расчетах ОС, обеспечивающих высокое качество *цветопередачи*, рабочая область спектра продлевается в коротковолновую часть до длин волн до  $\lambda_h = 404.66 \text{ нм}$ .

Оптические стекла большей части марок имеют близкую к линейной зависимость относительных частных дисперсий от коэффициентов дисперсий («нормальная» прямая).

В отечественном каталоге – это прямая, проходящая через координаты  $p_{F',e}$  и  $v_e$  стекол марок К18 и Ф13 (рис. 2.2), уравнение которой  $p_{F',e} \cdot 10^3 = 542.9 - 0.5702 \cdot v_e$ .

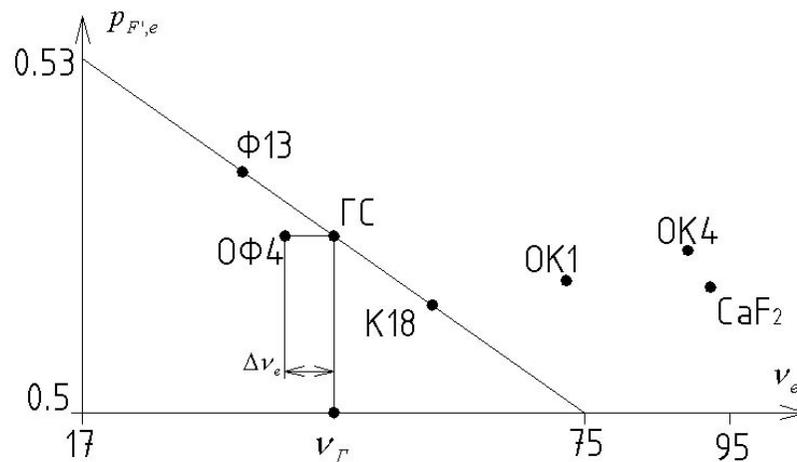


Рис. 2.2. Нормальная прямая

Для работы оптических приборов в условиях сильного облучения предусмотрены радиационно-оптические устойчивые стекла, мало темнеющие в этих условиях. Марки таких стекол образуются путем прибавления числа 100 к марке обычного стекла с практически теми же оптическими постоянными, которые называются стеклами серии 100. Некоторые стекла (ЛК107, ТК123, КФ100, ФК114, Ф101, 102, 104, 106, 108, 109, 113, ТФ103, 104, 107) имеют отличные от обычных марок оптические постоянные.

## 2.7. Оптические характеристики материалов для инфракрасной области спектра

Для работы в *ближней ИК области* спектра, где длина волны  $\lambda$  не превышает 2.6 мкм (приборы ночного видения), могут применяться обычные бесцветные оптические стекла. В диапазоне  $\lambda = 1-1.8$  мкм подавляющее большинство оптических бесцветных стекол имеет коэффициент дисперсии порядка  $\nu_{1.4} \approx 50$ , исключающий возможность коррекции хроматизма. Только сочетание особых стекол позволяет исправить хроматизм в этом диапазоне (стекло ОК1 имеет  $\nu_{1.4}=75.62$ , а ОФ4 –  $\nu_{1.4}=41.83$ ). В области  $\lambda = 2-2.6$  мкм у обычных бесцветных стекол наблюдаются существенные различия в коэффициентах дисперсии (стекло К8 –  $\nu_{2.3}=47.04$ , ТФ4 –  $\nu_{2.3}=78.01$ ). Используя стекла ОК1 и ОФ4 или материал флюорит ( $\nu_{1.4}=105.63$ ), возможно создание ахроматов от видимой области спектра до длины волны 2.6 мкм.

В дальней ИК области спектра земная атмосфера имеет *два окна прозрачности*: 3–5 мкм и 8–12 мкм (используются в тепловидении). Количество материалов, обладающих малым поглощением излучения в этих диапазонах и хорошими физико-химическими свойствами, крайне ограничено. В особенности это относится к диапазону 8–12 мкм. Оптические константы основных материалов, используемых для области спектра 3–5 мкм, приведены в табл. 2.1. (основная длина волны  $\lambda = 4$  мкм).

Таблица 2.1. Материалы для области спектра 3–5 мкм

Наименование материала	$n_4$	$\nu_4$
Флюорит	1.40966	21.68
Фтористый литий $LiF$	1.34942	8.74
Германий $Ge$	4.02453	101.9
Кремний $Si$	3.42550	239.0
Селенид цинка $ZnSe$	2.43410	192.5

Оптические константы основных материалов, используемых в диапазоне с длинами волн 8–14 мкм, приведены в таблице 2.2. Здесь основная длина  $\lambda_0 = 10.6$  мкм,  $\nu_0 = (n_0 - 1) / (n_8 - n_{14})$ ;  $p = (n_8 - n_0) / (n_8 - n_{14})$ .

Таблица 2.2. Материалы для области спектра 8–14 мкм

Наименование материала	$n_0$	$\nu_0$
ИКС25	2.76563	93.27
ИКС29	2.59822	74.65
Германий <i>Ge</i>	4.00203	93.81
Селенид цинка <i>ZnSe</i>	2.40553	33.07

Наиболее часто используется сочетание германия с селенидом цинка для создания ахромата, когда относительная оптическая сила положительной линзы из германия близка к единице ( $\Phi_1=1.037$ ), а относительная оптическая сила отрицательной линзы из селенида цинка  $\Phi_2=-0.037$ . Часто используют сочетание флюорита с фтористым литием, т.к. материалы предпочтительны с технологических позиций: они оба прозрачны и в видимой области спектра, что упрощает центрировку и юстировку линз

### 3. АБЕРРАЦИОННЫЕ ПОЛИНОМЫ

#### 3.1. Основные формулы разложения Зейделя

На предварительных этапах проектирования расчет сложных ОС сводят к расчету его отдельных компонентов, которые имеют невысокие оптические характеристики. Предварительные решения облегчают также расчет светосильных и широкоугольных систем. При этом наиболее эффективны расчеты в области aberrаций 3-го порядка (область Зейделя). Используют математическую зависимость между входными координатами лучей и поперечными aberrациями – *систему алгебраических уравнений*. Формулы, основанные на разложениях aberrаций 3-го порядка по степеням апертуры и поля зрения, называют *aberrационными полиномами*.

В практике расчетов принято разделять aberrации на две группы: монохроматические и хроматические.

*Условия нормировки:*

$$1) h_1 = \alpha_1 S_1; \beta_1 = 1; S_p = H_1 (S_1 = \text{const}; S_p = \text{const});$$

$$2) \alpha_1 = 0, \alpha'_1 = 1, h_1 = 1, \beta_1 = 1, I = -1; (S_1 = -\infty).$$

Выражения для сумм (коэффициентов) Зейделя, определяющих пять монохроматических aberrаций:

$$\begin{aligned} S_I &= \sum_{k=1}^{k=p} h_k P_k; \\ S_{II} &= \sum_{k=1}^{k=p} h_k P_k \left( \frac{\Delta \beta_k}{\Delta \alpha_k} \right); \\ S_{III} &= \sum_{k=1}^{k=p} h_k P_k \left( \frac{\Delta \beta_k}{\Delta \alpha_k} \right)^2; \\ S_{IV} &= \sum_{k=1}^{k=p} \frac{1}{h_k} \cdot \frac{\Delta(\alpha_k n_k)}{n_k n'_k}; \\ S_V &= \sum_{k=1}^{k=p} \left[ h_k P_k \left( \frac{\Delta \beta_k}{\Delta \alpha_k} \right)^2 - I^2 \left( \frac{\Delta \chi_k}{r_k} \right) \right] \frac{\Delta \beta_k}{\Delta \alpha_k}. \end{aligned} \quad (3.1)$$

$S_{IV} = -\sum_{k=1}^{k=p} \frac{\Delta \chi_k}{r_k}$  описывает кривизну Петцваля; она зависит только от радиусов поверхностей.  $P$ ,  $W$  – вспомогательные абберационные величины (обратная величина показателя преломления  $\chi_k = \frac{1}{n_k}$ ):

$$P_k = W_k \frac{\Delta \alpha_k}{\Delta \chi_k}, \quad W_k = \left( \frac{\Delta \alpha_k}{\Delta \chi_k} \right) \Delta(\alpha_k \chi_k). \quad (3.2)$$

При расчёте новых ОС целесообразно исключать выражения для 2-го параксиального луча. Если  $m$  – число бесконечно тонких компонентов в воздухе, то:

$$\begin{aligned} S_I &= \sum_{i=1}^{i=m} h_i P_i; \\ S_{II} &= \sum_{i=1}^{i=m} H_i P_i - I \sum_{i=1}^{i=m} W_i; \\ S_{III} &= \sum_{i=1}^{i=m} \frac{H_i^2}{h_i} P_i - 2I \sum_{i=1}^{i=m} \frac{H_i}{h_i} W_i + I^2 \sum_{i=1}^{i=m} \Phi_i; \\ S_{IV} &= \sum_{i=1}^{i=m} \Phi_i \pi_i; \\ S_V &= \sum_{i=1}^{i=m} \frac{H_i^3}{h_i^2} P_i - 3I \sum_{i=1}^{i=m} \frac{H_i^2}{h_i^2} W_i + I^2 \sum_{i=1}^{i=m} \frac{H_i}{h_i} \Phi_i (3 + \pi_i). \end{aligned} \quad (3.3)$$

Недостаток разложения Зейделя:

сферические и несферические поверхности (НП) рассматриваются отдельно. Базовой считается ОС из сферических поверхностей, которая усовершенствуется введением одной–двух несферических поверхностей.

Абберационный расчет проводится в два приема:

- сначала для базовой системы,
- далее с деформациями поверхностей.

### 3.2. Преобразованные коэффициенты

*Преобразованные коэффициенты* – абберационные полиномы в переменных Ланге ( $m$  – число поверхностей). Обычно используют «коэффициенты с нулями» для положения входного зрачка  $S_p = 0$ .

$$\left. \begin{aligned}
 B_0 &= \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} h_s Q_s; \\
 K_0 &= -\frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} W_s + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} h_s Q_s S_s; \\
 C_0 &= \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} \frac{\chi_{s+1} \alpha_{s+1} - \chi_s \alpha_s}{h_s} - \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} W_s S_s + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} h_s Q_s S_s^2; \\
 D_0 &= \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} \frac{\chi_s \alpha_{s+1} - \chi_{s+1} \alpha_s}{h_s} + C_0; \\
 E_0 &= -\frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} \frac{\chi_{s+1}^2 - \chi_s^2}{h_s^2} + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} S_s \frac{\chi_s \alpha_{s+1} - \chi_{s+1} \alpha_s}{h_s} + \\
 &\frac{3}{2} \sum_{s=1}^{s=m} S_s \frac{\chi_{s+1} \alpha_{s+1} - \chi_s \alpha_s}{h_s} - \frac{3}{2} \sum_{s=1}^{s=m} S_s^2 W_s + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} h_s S_s^3 Q_s.
 \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

*Вспомогательные величины*

$$\begin{aligned}
 S_S &= \sum_{k=1}^{k=s-1} \frac{\chi_{k+1} d_k}{h_k h_{k+1}}, \quad S_1 = 0; \quad Q_S = T_S \sigma_S + P_S; \quad T_S = \frac{(\chi_S \alpha_{S+1} - \chi_{S+1} \alpha_S)^3}{\chi_S \chi_{S+1} (\chi_{S+1} - \chi_S)^2}; \\
 P_S &= \left( \frac{\alpha_{S+1} - \alpha_S}{\chi_{S+1} - \chi_S} \right)^2 (\chi_{S+1} \alpha_{S+1} - \chi_S \alpha_S); \quad W_S = \frac{\alpha_{S+1} - \alpha_S}{\chi_{S+1} - \chi_S} (\chi_{S+1} \alpha_{S+1} - \chi_S \alpha_S).
 \end{aligned} \quad (3.5)$$

*Достоинства* – в формулы в явном виде входит параметр  $\sigma_s$ , характеризующий отступление оптической поверхности от сферической формы (деформация поверхности), т.е. они могут использоваться для сферической и несферической (НП). Формулы привлекательны для зеркальных ОС.

Радиусы поверхностей и расстояния между элементами системы, связаны координатами нулевых лучей:

$$d_s = \frac{1}{\alpha_{s+1}}(h_s - h_{s+1});$$

$$r_s = h_s \frac{\chi_s - \chi_{s+1}}{\chi_s \alpha_{s+1} - \chi_{s+1} \alpha_s}. \quad (3.6)$$

### 3.3. Монохроматические aberrации третьего порядка

Монохроматические aberrации 3-го порядка: для широкого пучка – сферической и комы и узкого – астигматизма, кривизны поля, дисторсии. Они взаимозависимы (если заданы 3 aberrации, 2 остальные определены).

**Предмет на бесконечности:**  $S_1 = \infty; \alpha_1 = 0; \alpha' = 1; h = f'; \beta_1 = 1$ .  $\bar{S}_I, \bar{S}_{II}, \bar{S}_{III}, \bar{S}_{IV}, \bar{S}_V$  – приведенные суммы Зейделя для  $f' = 1$ ;  $\sigma'$  – задний апертурный угол;  $\omega_1$  – угол поля зрения;  $y'$  – размер изображения:

$$\text{сферическая aberrация } \Delta s' = -\frac{1}{2} f' \text{tg}^2 \sigma' \bar{S}_I;$$

$$\text{кома } \Delta y'_k = -\frac{3}{2} f' \text{tg}^2 \sigma' \text{tg} \omega_1 \bar{S}_{II};$$

$$\text{астигматизм } z'_s - z'_m = f' \text{tg}^2 \omega_1 \bar{S}_{III};$$

$$\text{кривизна поверхности Петцваля } z'_p = -\frac{y'^2}{2} \frac{\bar{S}_{IV}}{f'};$$

$$\text{дисторсия } \Delta y'_D = -\frac{1}{2} f' \text{tg}^3 \omega_1 \bar{S}_V.$$

Величина  $\eta = \frac{\Delta s'}{s'_{0,p} - s'_0} + \frac{\Delta f'}{f'} = \frac{1}{2} \text{tg}^2 \sigma' \bar{S}_{\text{II}}$  характеризует отступление от условия изопланатизма и используется для расчета меридиональной комы  $K_{\text{III}} = 3y' \eta$ .

**Предмет на конечном расстоянии:**  $S \neq \infty$ . Условия нормировки ( $\alpha_1 = \beta^\times$ ,  $\alpha' = \beta_1 = 1$ ,  $h_1 = s_1 \alpha_1$ )

$$\Delta s' = -\frac{1}{2} f' \text{tg}^2 \sigma' S_{\text{I}};$$

$$\Delta y'_k = -\frac{3}{2} f' \text{tg}^2 \sigma' \text{tg} \omega_1 S_{\text{II}};$$

$$z'_s - z'_m = \text{tg}^2 \omega_1 S_{\text{III}}; z'_p = -\frac{y'^2}{2} S_{\text{IV}}; \quad (3.7)$$

$$\Delta y'_D = -\frac{1}{2} \text{tg}^3 \omega_1 S_{\text{V}};$$

$$\eta = -\frac{1}{2} (\text{tg}^2 \sigma' S_{\text{II}}) / I, \quad \eta = \frac{\Delta s'}{s'_{0,p} - s'_0} + \frac{\Delta \beta_0}{\beta_0}, \quad \text{где } I = n_1 \alpha_1 y_1 = \beta^\times (s_p - s).$$

## 4. МЕТОДЫ КОРРЕКЦИИ АБЕРРАЦИЙ

Аберрационный расчет – такой расчет ОС, в результате которого определяются конструктивные параметры элементов схемы, обеспечивающие необходимое качество изображения или нужную структуру выходящих пучков. Типы аберрационного расчёта: проектный и проверочный.

Методы аберрационного расчета: проб; алгебраический; комбинированный, синтеза (композиции); автоматической оптимизации.

### 4.1. Метод проб

Метод проб решает задачу изучения влияния различных параметров базовой ОС на ее аберрации и отысканию значений конструктивных параметров, при которых аберрации будут допустимыми. Первоначально из каталогов, архивных данных, патентов, ИПС (информационно-поисковой системы) по требуемым характеристикам подбирают базовую ОС (прототип), которую пересчитывают при необходимости на требуемое фокусное расстояние или линейное увеличение. Для этого определяют коэффициент масштабирования:  $\gamma = f'_{\text{тр}} / f'_k$ , где  $f'_{\text{тр}}$  – требуемое значение фокусного расстояния;  $f'_k$  – значение фокусного расстояния из каталога; все значения радиусов кривизны, толщин и воздушных промежутков умножают на этот коэффициент. Базовая система (прототип) выбирается по оптическим характеристикам: полю зрения  $2\omega_{\text{тр}} \leq 2\omega_k$ , фокусному расстоянию  $f'_{\text{тр}} \approx f'_k$ .

Метод проб, т.е. перерасчет известных систем, чрезвычайно прост, но весьма продолжителен по времени, увлечение им неизбежно связано с опасностью застоя и не способствует созданию оригинальной оптики. Оптик-конструктор должен иметь при этом высокую квалификацию и хорошую интуицию.

### 4.2. Алгебраический метод

Вводятся условия нормировки и составляется система аберрационных уравнений. Выражения для аберраций при бесконечно удаленном предмете значительно проще, поэтому при возможности ОС разбивают на блоки для предмета – на бесконечности ( $S = \infty$ ), часто такие блоки рассчитывают в обратном ходе (расчет окуляров, проекционных объективов и т.п.). Целесообразно, чтобы аберрации блоков компенсировали друг друга.

Например, в системе с тремя независимыми параметрами  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $\alpha_4$  три основных aberrации – сферическая aberrация, кома и астигматизм – могут быть равны нулю в области третьих порядков:  $S_I = f_1(\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) = 0$ ;  $S_{II} = f_2(\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) = 0$ ;  $S_{III} = f_3(\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) = 0$ . Один параметр обычно оставляют свободным. К aberrационным уравнениям добавляют выражения, вытекающие из конструктивных, технологических и других требований, предъявляемых к оптике прибора. Получаемая таким образом система уравнений служит для определения неизвестных оптических параметров: углов  $\alpha_s$ , осевых расстояний  $d_s$  (высот лучей на главных плоскостях  $h_s$ ), радиусов  $r_s$  и деформаций  $\sigma_s$  несферических поверхностей.

Параметры  $\alpha_s, h_s$ , связанные с  $d_s$  и  $r_s$ , определяют параксиальные характеристики, так называемые «воздушные» углы определяют оптическую силу компонентов. На произвольном  $k$ -м компоненте координаты

1-го параксиального луча описываются выражениями  $\alpha_{k+1} = \frac{n_k}{n_{k+1}} \alpha_k + h_k \frac{n_{k+1} - n_k}{n_{k+1} r_k}$ ,  $h_{k+1} = h_k - \alpha_{k+1} \cdot d_k$ .

Метод имеет ограниченное применение в связи с невысокими оптическими характеристиками рассчитываемых систем (относительного отверстия  $D/f'$  и поля зрения  $2\omega$ ). При увеличении  $D/f'$  необходимо вести учет aberrаций высших порядков и проводить решение алгебраическим методом с помощью компьютерных программ.

### 4.3. Комбинированный метод

Метод применяется для расчета систем средней сложности. В первом приближении оптику рассчитывают по теории aberrаций 3-го порядка, получая базовую систему. Далее

выполняется расчет хода действительных лучей;

определяются aberrации высших порядков;

вводят поправки в коэффициенты aberrаций III порядка базовой ОС (по формулам связи).

После введения поправок решается алгебраическая система уточненных уравнений и заново рассчитываются высоты действительных лучей на поверхностях ОС. Таких операций (шагов) может быть несколько до получения удовлетворительного качества изображения или необходимой структуры пучков лучей на выходе из оптической системы.

#### 4.4. Метод автоматической оптимизации

Задача оптимизации – поиск такой комбинации параметров, при которой проектируемая ОС обладает наилучшим качеством коррекции аберраций при обеспечении контроля граничных значений всех конструктивных параметров, а также функциональных, эксплуатационных и технологических характеристик.

Процедура оптимизации: определяется структура критерия качества ОС, составляются списки параметров и ограничений. Этапы оптимизации:

выбор базовой системы первого приближения (знание минимального числа параметров конструкции схемного решения);

удачный выбор исходной системы на ранних этапах разработки в значительной мере сокращает общее время проектирования;

оптимальное решение находят компьютерным путем, используя специальные программные комплексы: ZEMAX, CODE–5, OSLO, OPAL и др.

Программы автоматизированного расчета ОС способны привести заданную ОС к ближайшей оптимальной конфигурации с помощью минимизации определенной оценочной функции, которая обычно представляется в виде суммы квадратов величин выбранных аберраций.

*Список параметров* – описание варьируемых параметров (кривизны поверхностей, толщины, осевые промежутки, квадраты эксцентриситетов асферических поверхностей второго порядка, коэффициенты асферики высшего порядка, коэффициенты деформации ДОЭ, передний и задний отрезок, положение АД).

*Список ограничений* – описание областей допустимых решений. Параксиальные характеристики: увеличение, положение плоскости Гаусса, задний отрезок, либо габариты контролируются ограничениями; при необходимости можно контролировать аберрации отдельных лучей.

*Критерий качества* – положительная функция от параметров ОС, значение которой определяет степень близости к «идеальному» решению. К примеру, это сумма квадратов отступлений от требуемых значений характеристик заданного набора (абберрации отдельных лучей или др. характеристики: увеличение, задний отрезок, длина системы и пр.). Чем меньше этот критерий, тем лучше очередной вариант. Часто вводят индивидуальные весовые множители и масштабные коэффициенты для определения относительной роли характеристик, участвующих в формировании критерия. Подбор конкретных значений весов или норм – задача сложная и трудоемкая. Коэффициенты разложения волновой аберрации описываются в единицах основной длины волны спектрального интервала.

#### 4.5. Композиционный метод

В методе затрагивают вопрос о выборе исходной ОС, обладающей необходимыми абберационными свойствами. Композиция дает возможность заранее выполнить необходимую коррекцию и избежать неоправданного нагромождения ненужных элементов.

*Типы создания оптической системы методом композиции:*

- по набору из поверхностей с известными абберационными свойствами;
- путем синтеза по базовым компонентам;
- простейшим параметрическим синтезом для систем с невысокими оптическими характеристиками.

В качестве поверхностей с известными свойствами используют изопланатические поверхности, вносящие примерно одинаковые абберации по всему полю; к ним относят:

- апланатическую, которая образует идеальное изображение одной сферы на другую (тип А);
- концентрическую к зрачку (КЗ);
- концентрическую к осевой точке предмета (КП).

Кривизну поверхностей определяют по главному лучу (при наборе поверхностей в гауссовой области в ОС могут не проходить реальные лучи); формулы для вычисления кривизны вводятся в компьютерные программы.

Такой синтез дает ОС, обладающую хорошими коррекционными возможностями для последующей оптимизации. В качестве параметров оптимизации выбираются осевые расстояния и положение АД, а в качестве оптимизируемых функций – отклонения от заданных значений основных параксиальных характеристик ( $\beta_0$ ,  $S'$ ,  $S_p$ ,  $S'_p$ ) и неконтролируемые автоматически абберации. В ограничения включаются условия прохождения главного и апертурного лучей на всех поверхностях, а также условия конструктивной реализации оптики.

Композиционный метод позволяет

- просматривать множество вариантов,
- в широких пределах менять конструкцию для получения требуемых результатов, пригодных для последующей оптимизации.

Метод синтеза использован для создания особо светосильных (1: 0,7–1: 1,2) и широкоугольных ( $2\omega > 60^\circ$ ) фото- и гидро-объективов, для которых другие методы расчета практически отсутствуют.

## 5. КОМПЬЮТЕРНЫЕ ПРОГРАММЫ АНАЛИЗА

### 5.1. Процедура «анализ»

В процессе *анализа* вычисляются значения оптических характеристик по известным конструкционным параметрам. Проводят анализ на различных уровнях.

Первый уровень:

- анализ в гауссовом приближении;
- анализ габаритов пучков;
- анализ в области aberrаций третьего порядка;
- экспресс-анализ aberrаций, т. е. вычисление aberrаций небольшого количества действительных лучей, достаточного для начальной эвристической оценки качества коррекции;
- полный анализ aberrаций, т. е. получение коэффициентов аппроксимирующего выражения, полностью описывающего aberrационную функцию;
- анализ пропускания по зрачку.

Математический аппарат анализа на этом уровне основан на геометрической оптике, и его значительную часть представляет собой расчет хода лучей через ОС.

Второй уровень анализа (экспресс-анализ и полный анализ):

- функция рассеяния точки (ФРТ);
- оптическая передаточная функция (ОПФ).

### 5.2. Программное обеспечение

На сегодняшний день предлагается несколько десятков универсальных пакетов программ для проектирования ОС различного назначения и ряд программных систем, предназначенных для проектирования специализированной оптики.

Универсальные программные системы, в свою очередь, можно разделить на две группы. Основной операцией при анализе работы ОС является расчет лучей. В первой группе пакетов программ для представления и анализа работы ОС используется классический подход, когда явно указывается последовательность взаимного расположе-

ния оптических элементов, т. е расчет лучей выполняется последовательно (к примеру, проектирование и анализ изображающих ОС). Вторая группа программных сред для представления и анализа работы ОС использует глобальную систему координат и непоследовательную (недетерминированную) процедуру расчета лучей, к примеру, проектирование и анализ осветительных систем).

В программных системах с последовательным описанием элементов ОС используются такие возможности:

- диалог с пользователем;
- двух- и трехмерная графика;
- описание исходных данных с помощью простого языка и таблиц;
- встроенный мультиэкранный редактор;
- встроенная база данных для хранения ОС и результатов расчета;
- каталоги оптических материалов;
- задание асферических поверхностей второго и более высоких порядков;
- операции перестройки, поворота, сдвига, оборачивания, масштабирования;
- библиотека ОС на основе патентов.

*Примечание:* **Фирмы и компании:**

1. <http://www.opticalres.com> OpticalResearchAssociates (ORA) США является лидером в области компьютерного проектирования ОС. Программный продукт Code V обладает самым обширным арсеналом средств для синтеза, анализа и оптимизации ОС. Результаты, полученные с помощью Code V, считаются высоко достоверными в оптической отрасли различных стран.

Представляет интерес относительно новый программный продукт этой компании LightTools.

2. <http://www.focus-software.com>. Компания FocusSoftwareInc является разработчиком самой известной и популярной на сегодняшний день программной системы для расчета оптики на персональных компьютерах Zemax. Пакет программ ПП позволяет анализировать ОС на основе последовательного или непоследовательного расчета лучей, выполнять глобальную и локальную оптимизацию параметров ОС. Дополнительный программный модуль Zelum позволяет разрабатывать осветительные ОС, а модули Zebase и Lensview дают возможность работы с самой обширной библиотекой, которая создана и постоянно обновляется специалистами компании. Интерфейс Zemax прост в использовании, к большинству функциональных возможностей обращаются, выбирая опции в диалоговых окнах или опускающихся меню. Доступны демонстрационные версии.

3. <http://www.lambdares.com>. Компания LambdaResearchCorporation предлагает программное обеспечение для проектирования и анализа работы ОС. Пакет прикладных программ TracePro позволяет проводить расчет лучей с учетом поглощения, отражения, преломления, рассеяния и дифракции света при прохождении через ОС. Фирма занимается распространением и поддержкой пакета программ для расчета оптики Oslo. Дополнительно доступны бесплатная версия Oslo LT и DOS-программная система обработки интерферограмм Apex.

4. <http://www.sinopt.com>. Фирма SinclairOptics США – разработчик одного из старейших ПП для проектирования оптики Oslo. Кроме информации о возможностях программного пакета на сайте можно найти учебные материалы по расчету оптики с использованием Oslo. Права на распространение и дальнейшее развитие пакетов программ переданы поставщику LambdaResearchCorporation, США [10]. Доступна версия Oslo LT.

5. <http://www.breault.com>. Компания BreaultResearchOrganization, известная также как BRO, является авторитетным разработчиком оптического программного обеспечения. Программа ASAP (AdvancedSystemsAnalysisProgram), разработанная в этой компании, широко используется для проектирования сложных изображающих и осветительных систем специального назначения. Программа APART, предназначенная для анализа паразитных засветок. Компания также предлагает специализированный программный продукт ReflectorCAD для конструирования отражателей. На сайте доступна демонстрационная версия программы ReflectorCAD; работает электронная библиотека источников освещения (BRO LightSourceLibrary), которая содержит конструктивные параметры и математические модели различных источников оптического излучения.

6. <http://www.sciopt.com>. Компания SCIOPT Enterprises предлагает широкий спектр оптических программных продуктов: Paraxia-Plus – программный пакет для проектирования лазерных систем и моделирования распространения пучков в лазерных резонаторах; Optec – программная система для расчета лучей и проектирования ОС; Sigraph-Optik/Caos – пакет прикладных программ для проектирования интегральной оптики.

## 6. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### 6.1. Исходные принципы оценки качества изображения

Оптическая система, полученная в результате синтеза и оптимизации, должна иметь определенное качество изображения, зависящее от ее применения. Однако ОС никогда не изображает точку в виде точки.

С одной стороны этому препятствуют aberrации, с другой – дифракция света. Это приводит к тому, что изображение точки становится нерезким, расплывчатым, мелкая структура предметов передается неправильно, в результате две близко расположенные точки сливаются в одно пятно, изображения решеток расплываются в серый фон и т.п. Даже безабберационная система вследствие дифракции дает изображение точки в виде кружка рассеяния малых, но конечных размеров. С позиций геометрической оптики – чем меньше aberrации, тем выше качество изображения. Однако это очевидное соответствие требует более глубокого анализа.

Под *качеством изображения* обычно понимают степень соответствия геометрических, фотометрических и спектральных характеристик изображения и предмета. Для оценки качества изображения существуют

- количественные,
- качественные характеристики.

*Количественные критерии* – мера оценки качества. Количественные критерии должны быть разными в зависимости от

- назначения оптической системы,
- ее оптических характеристик,
- типа приемника.

Количественные критерии:

- разрешающая способность ( $N; \delta$ );
- размер кружка рассеяния, обычно размер  $2\Delta u'$ , приблизительно считают, что  $N=1/2\Delta u'$ ;
- ОПФ – оптическая передаточная функция;
- частотно-контрастная характеристика ЧКХ (количество сформированных элементов изображения с соответствующим контрастом);
- ФПК – функция порогового контраста, вычисляемая по результатам измерения характеристик используемой пленки (ЧКХ, коэффициент контрастности, показатель гранулярности);

- критерий оценки изображительных свойств ОС – предельная разрешающая способность, определяемая точкой пересечения ЧКХ фотооптической системой с ФПК;
- функция светораспределения;
- геометрические aberrации,
- волновые aberrации (к примеру, в микроскопе  $W = \Delta A^2 / 2\lambda A$ ; где  $\Delta$  – расфокусировка – нужно всегда выбирать плоскость установки, при  $W=0,5\lambda$  объектив микроскопа считается ахроматическим);
- точечные диаграммы (ТД);
- численные критерии пограничной кривой (исследуется тест-объект, яркость которого меняется функцией скачка).

При исследовании распределения освещенности различают макроструктуру и микроструктуру пятна рассеяния. *Макроструктура* обусловлена наличием в нем фокальных линий и точек, в которых происходит сосредоточение световой энергии. Фокальные линии (в частном случае - точки) возникают в результате пересечения каустики пучка экраном, воспринимающим изображение. *Микроструктура* представляет собой полосатое строение отдельных участков пятна, обусловленное интерференцией, возникающей при наложении друг на друга частей светового потока, имеющих некоторую разность хода и когерентных (от одного источника). Микроструктура, накладываясь на макроструктуру пятна рассеяния, влияет на разрешающую способность.

*Качественные критерии:*

- подобие изображения предмету не только по общему контуру, но и в каждой отдельной его точке;
- контраст составляющих элементов изображения, их количество и взаимное расположение по полю;
- возможность регистрации элементов изображения приемниками (глазом, светочувствительным слоем пленки, фотоприемником и т.д.) с минимальными искажениями;
- ЧФХ (ФПФ) – качественное соответствие геометрического положения элементов изображения по отношению к предмету;
- функция рассеяния ФР – математически описывает распределение освещенности в изображении, образуемом ОС; предмет рассматривается как совокупность светящихся точек или линий:

$$\Phi_{РЛ} A'(x', y') = \int_{-\infty}^{+\infty} A'(x', y') dy'; \Phi_{РТ} A'(x', y') = \left[ \frac{2J_1(x)}{x} \right]^2.$$

Эти функции обычно нормируют, принимают объем, ограничиваемый ими = 1.

ФРТ и ФРЛ – импульсная реакция или импульсный отклик (аналогия с теорией связи). В ОС аналоги бесконечно короткого импульса это бесконечно малая точка или бесконечно узкая щель.

**Требования к качеству изображения** определяются назначением системы. Примеры:

1) объективы телескопов, предназначенных для наблюдения звезд и других объектов, должны иметь качество изображения, которое бы позволило различать две звезды при наименьшем расстоянии между ними;

2) при малом поле зрения (астрономические объективы) достаточно оценивать качество изображения осевой точки, которое должно быть практически идеальным;

3) при художественном воспроизведении объекта (фотографические объективы) важным является соответствие изображения и предмета не только по геометрическим и фотометрическим, но и по спектральным характеристикам (для них рассчитывается коэффициент цветопередачи, а для оценки качества изображения важна связь количественных оценок изображения с его психофизиологическим восприятием);

4) ОС, используемые в каналах связи, должны передавать и регистрировать максимальное количество информации, поступающей от объекта.

Существуют 2 класса систем по требованиям к качеству изображения:

- дифракционно-ограниченные,
- геометрически-ограниченные

Системы *дифракционно-ограниченные* это высококачественные ОС, формирующие изображение, близкое к дифракционному. Для них дифракция оказывает существенное влияние на распределение энергии в пятне рассеяния. К ним относятся: объективы телескопов, геодезических зрительных труб, микрообъективы, имеющие небольшое поле и объективы с достаточно высокими оптическими характеристиками, предназначенными для микроэлектронного производства.

Наиболее обширный класс составляют *геометрически-ограниченные* системы, где остаточные aberrации не позволяют получить изображение, сравнимое с дифракционным. К ним относятся кино-, фото- и телевизионные объективы, многие системы для оптико-электронных приборов и т.п. Они имеют достаточно большое угловое поле (от  $40^0$  до  $120^0$ ). Для этих систем распределение энергии в изображении точки и малой светящейся площадки полностью определяется геометрическими aberrациями, а не дифракцией.

## 6.2. Разрешающая способность оптических систем

Разрешающая способность – наиболее важная характеристика качества изображения, которая показывает – сколько линий или предметных точек может изобразить отдельно фотосистема на отрезке длиной 1 мм, (фото – $N$ );

– при каком минимальном расстоянии между двумя точками они изображаются системой в виде двух точек (микроскопы  $\delta = \lambda / 2A$ ).

Разрешающая способность объективов телескопических систем выражается в угловой мере, чаще в секундах, для фотообъективов – в  $\text{мм}^{-1}$ , для объективов микроскопов – в линейной мере (в  $\mu\text{м}$ ).

Недостатки этого критерия

- не несет информацию о качестве формирования элементов, имеющих размеры больше минимальных,
- не дает представлений о передаче контраста,
- зависит от свойств приемника.

Т.е. он не дает полного представления о качестве изображения.

Изображение точки ИОС представляет собой дифракционную картину (вид центрального светлого пятна (диск Эри), окруженного дифракционными кольцами). Распределение интенсивности  $J$  света приведено на рис. 6.1.

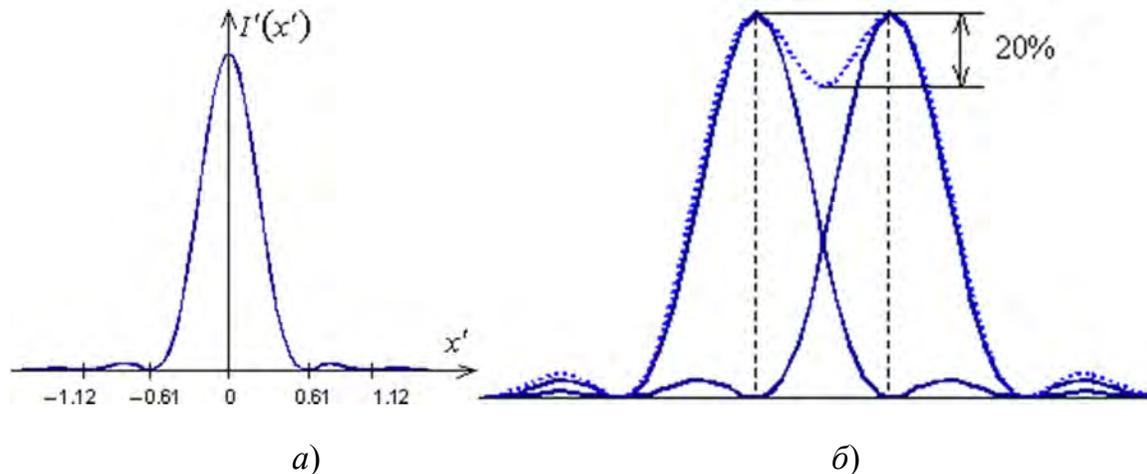


Рис. 6.1: а) – дифракционное изображение точки; б) – разрешение двух дифракционных точек по критерию Релея

*Разрешающая способность* – критерий количественной оценки качества изображения, создаваемого ОС. Угловое расстояние,  $\psi_{\min}$  для первого темного кольца, определяется по теоретическому критерию Рэлея:

$\psi_{\min} = (1,22/D) \lambda$ ; где  $D$  – диаметр входного зрачка;  $\lambda$  – длина волны света. *Критерий Рэлея* позволяет количественно определить разрешающую силу различных оптических приборов: изображения двух одинаковых точечных источников света считаются разрешимыми, если центральный максимум дифракционной картины от одного точечного источника совпадает с первым минимумом дифракционной картины от другого (рис 6.1, б).

*Различают:*

- визуальную разрешающую способность  $N_0$  в  $\text{мм}^{-1}$  объектива: определяют визуальным путём по изображению штриховой миры;
- разрешающую способность фотослоя  $N_c$  в  $\text{мм}^{-1}$  (фотоплёнки);
- фотографическую разрешающую способность системы объектив-фотослой.

Визуальная разрешающая способность для идеального объектива	$N_0 = \frac{1}{\delta'_0}$	
Линейный предел разрешения	$\delta'_0 = \frac{1.22 \cdot \lambda}{D} = 1.22 \cdot \lambda \cdot k$	6.1
Для $\lambda = 0,546$ мкм	$N_0 = \frac{1500D}{f'}$	6.2

Разрешаемое угловое расстояние в пространстве предметов  $\psi = 140''/D$ .

Для фотообъективов изображения удаленных точек находятся в задней фокальной плоскости, где линейный предел разрешения равен:  $\delta'_0 = \psi f'_{об}$ , где  $f'_{об}$  – фокусное расстояние объектива.

Разрешающая способность фотографического объектива определяется числом  $N$  штрихов в изображении объекта, приходящихся на длину 1 мм, когда эти штрихи находятся на пределе их разрешения.

$N = 1/\delta'_0 = 1/(\psi f'_{об})$  [ $\text{мм}^{-1}$ ], или

$$N = \frac{206 \cdot 10^3 \cdot D}{140 \cdot f'_{об}} = 1500 \frac{D}{f'_{об}} [\text{мм}^{-1}].$$

Определение визуальной разрешающей способности объектива производится при помощи специальных тест-объектов, штриховых мир.

Мерой разрешающей способности объектива является число штрихов (или линий) предельной группы на 1 мм в плоскости изображения. Это число определяется по величине углового расстояния  $\bar{\psi}$  между изображениями двух разрешаемых штрихов миры визуальным путем  $\bar{N} = \frac{1}{\bar{\Delta}} = \frac{206 \cdot 10^3}{f_{об} \cdot \bar{\psi}}$ , где  $\bar{\Delta}$  – фактическое разрешаемое расстояние между изображениями двух штрихов.

### 6.3. Влияние aberrаций на разрешающую способность

При малых aberrациях качество изображения достаточно хорошо характеризуется освещенностью в центре кружка Эри. Если ОС не свободна от сферической aberrации, распределение освещенности в дифракционном пятне рассеяния изменяется, причем часть световой энергии переходит из кружка Эри в кольца, центральный максимум понижается, максимумы в кольцах становятся более высокими, в минимуме падение освещенности не достигает нуля.

Одним из критериев качества изображения является **критерий резкости изображения** – определительная яркость или число Штреля.  $K = \frac{E}{E_0}$ , где  $E_0$  – освещенность в центре кружка Эри при отсутствии сферической aberrации,  $E$  – при малых aberrациях. При  $k \leq 0,75$  изображение почти не отличается от изображения безaberrационной системы. Допустимым является  $k = 60\%$ .

Нахождение величины  $k$  требует предварительного определения волновых aberrаций  $\Delta l$  конкретной ОС.

Коэффициент Штреля равен

$$\frac{E}{E_0} = \frac{4}{(m')^4} \left[ \left( \int_0^{m'} y \cos \frac{2\pi \Delta l}{\lambda} dy \right)^2 + \left( \int_0^{m'} y \sin \frac{2\pi \Delta l}{\lambda} dy \right)^2 \right]. \quad (6.3)$$

Должны быть известными:  $m'$  – половина диаметра выходного зрачка,  $y$  – произвольные координаты на зрачке.

## 6.4. Качественные параметры оценки качества изображения

*Качество оптического изображения* – степень соответствия геометрической, фотометрической и спектральной характеристик изображения и предмета. Изображение должно быть подобно предмету не только по контуру, но и в каждой его точке: из-за аберраций и дифракций изображение получается размытое, и мелкая структура передается неправильно. Необходимо учитывать:

1. при малом поле зрения (астрономические системы) достаточно рассматривать изображения по осевой точке, которые должны быть идеальными;
2. при художественном воспроизведении (фотообъективы) смотрят соответственно по геометрическим и спектральным характеристикам и требуемом коэффициенте цветопередачи;
3. оптические системы, используемые в канале связи, должны передавать и регистрировать максимальное количество информации, поступающей от объекта.

*К качественным параметрам* оценки качества изображения относят контраст составляющих элементов изображения и их взаимное расположение в пределах поля; возможность регистрации элементов изображения различными приемниками с минимальными искажениями; функцию передачи фазы (ЧФК), которая определяет качественное соответствие геометрического положения элементов изображения по отношению к предмету; функцию рассеяния, которая позволяет математически описывать распределения освещенности в изображении.

*Функция рассеяния точки ФРТ* вычисляется как квадрат модуля от преобразования Фурье зрачковой функции, включающей в себя контур зрачка в качестве области определения и волновую аберрацию для данной точки поля в качестве аргумента.

*Функция рассеяния линии ФРЛ* представляет собой распределение интенсивности в изображении бесконечно длинной линии (в направлении  $Y$ –меридиональная ФРЛ или  $X$ –сагиттальная ФРЛ).

*Функция рассеяния точки* выводится в виде карты уровней равной интенсивности или в трехмерном виде. В заголовке рабочего окна выводится число Штреля (рис. 6.1).

Вид отображения устанавливается в окне «Edit». Остальные настройки этого пункта стандартные для работы «Анализ функции рассеяния точки».

*Анализ геометрического изображения.* Работа предназначена для анализа структуры изображения центрированных ОС в геометрическом приближении. Режим используется при анализе изображения геометрически ограниченных систем, в которых не учитываются дифракционные эффекты, искажающие истинную структуру изображения. Вычисление всех характеристик в геометрическом приближении основано на определении поперечных aberrаций для большого количества точек. Количество точек устанавливается в поле «Количество точек на зрачке» окна «Edit».

При задании нескольких длин волн можно рассчитывать полихроматические характеристики с учетом функции спектральной эффективности или монохроматические характеристики для центральной длины волны (поле «Характеристики <Полихроматические / Монохроматические>»).

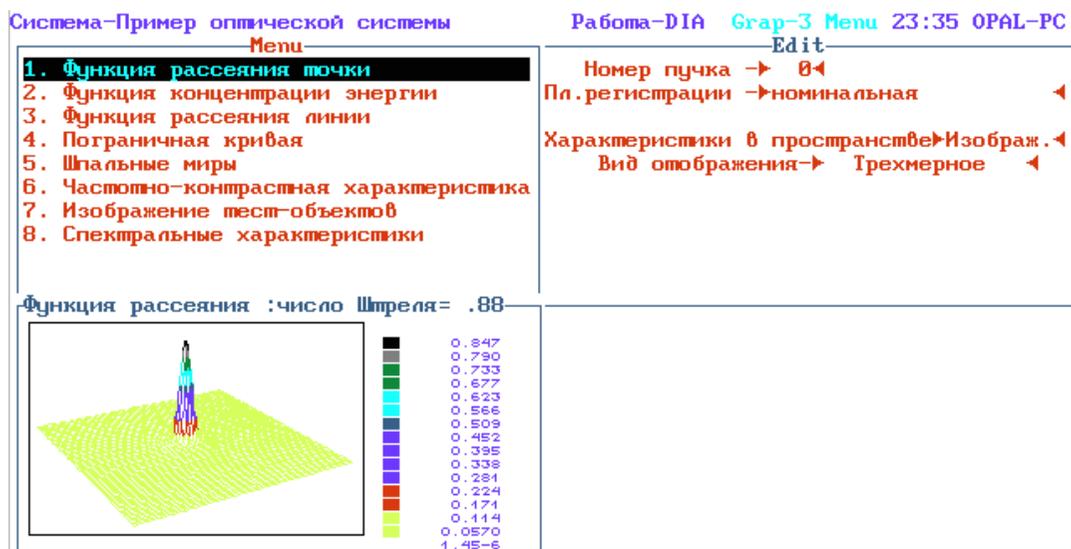


Рис. 6.2. Функция рассеяния точки

Кроме того, для всех пунктов в окне «Edit» можно задавать номер пучка и смещение плоскости установки.

## 6.5. Волновые критерии оценки качества изображения

1. *Критерий Рэля* предложен для оценки высококачественных систем. Рэлей показал, что остаточная сферическая aberrация не оказывает заметного влияния на качество изображения, если оптическая разность хода любой пары лучей из всего пучка не более  $\lambda/4$ . Оптическую систему можно считать практически идеальной, если она удовлетворяет критерию Рэля  $W \leq 0.25\lambda$ . Этот критерий успешно применяется в тех случаях, когда график волновой aberrации имеет плавный вид (дефокусировка, сферическая aberrация третьего порядка). Этому критерию примерно соответствует критерий Штреля, равный 0,8.

2. Для некоторых оптических систем (микрообъективы, астрономические объективы) с малым полем выполнения критерия Рэля недостаточно для получения хорошего качества изображения. К таким системам применяют *критерий Рождественского*  $N \leq \lambda/10$ .

3. *Наибольшие отклонения или деформация  $\Delta W_{\max}$  волнового фронта.*

Величина  $\Delta W_{\max}$  характеризуется алгебраической суммой наибольших отклонений волнового фронта от сферы сравнения (рис. 6.3).

Критерий Рэля  $W \leq 0.25\lambda$  нельзя применять, если волновая aberrация меняется по сложному закону и распределение освещенности в осевой точке (функция рассеяния точки) может быть существенно искажено. Качество изображения зависит не только от величины  $\Delta W_{\max}$ , но и от формы волнового фронта, от его местных деформаций, их расположения.

4. Для учета этих факторов удобно применять *критерий среднеквадратической деформации* или отклонения волнового фронта.

Среднеквадратическое отклонение  $W_{СКВ}$  монохроматического волнового фронта – критерий был предложен Марешалем. Выясним геометрический смысл величины  $W_{СКВ}$ . Обозначим через  $R_w$  сферу сравнения (рис. 6.3), через  $W$  – волновую aberrацию относительно этой сферы. Введем новую сферу сравнения  $R_w'$ , обозначим волновую aberrацию относительно новой сферы сравнения через  $W'$ .

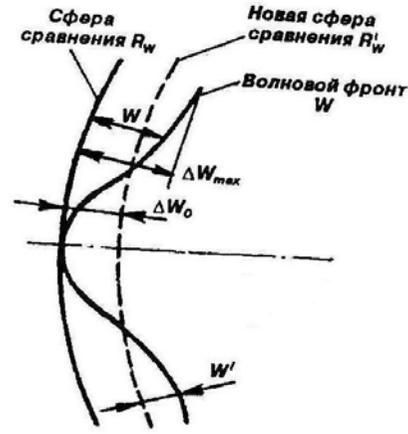


Рис. 6.3. К определению среднеквадратического отклонения волнового фронта

При этом  $R - R' = \Delta W_0$  – постоянная величина, тогда  $W^2 - (W')^2 = W^2 - (W)^2$ . Подберем сферу сравнения  $R'_w$  так, чтобы среднеарифметическое значение волновой аберрации  $\bar{W}' = \frac{1}{S} \iint W' ds = 0$ , где  $S$  – площадь выходного зрачка, тогда  $\bar{W}'^2 = W_{CKB}^2 = \bar{W}^2 - (\bar{W})^2$ . Таким образом, величину  $W_{CKB}$  можно вычислить двумя способами.

Первый способ

$$W_{CKB} = \left[ \overline{(W - \bar{W})^2} \right]^{0,5} = \left[ \iint_s (W - \bar{W})^2 ds \right]^{0,5} = \left[ \bar{W}^2 - (\bar{W})^2 \right]^{0,5}. \quad (6.4)$$

В полярных координатах:  $W_{CKB} = \left\{ \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 W^2(\rho, \varphi) \rho d\rho d\varphi - \frac{1}{\pi^2} \left[ \int_0^{2\pi} \int_0^1 W(\rho, \varphi) \rho d\rho d\varphi \right]^2 \right\}^{0,5}$ , где волновая аберрация  $W$

определяется относительно сферы сравнения  $R_w$ .

Вторым способом монохроматическую среднеквадратическую волновую аберрацию можно найти по формуле

$$W_{CKB} = \bar{W}' = \frac{1}{\pi^2} \left[ \int_0^{2\pi} \int_0^1 W'^2 \rho d\rho d\varphi \right]^{0,5}, \text{ в которой } W' \text{ определяется относительно оптимальной сферы сравнения } R'_w.$$

Если aberrации малы, то освещенность в центре дифракционного изображения можно выразить через средний квадрат  $W_{СКВ}^2$ . Для нормированной освещенности, когда в центре дифракционного пятна освещенность равна единице, получим известную формулу Марешаля

$$E'_{0,норм} \approx 1 - \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 W_{СКВ}^2. \quad (6.5)$$

Для безабберационной системы  $E'_{0,норм} = 1$ . При наличии aberrаций освещенность уменьшается на величину, пропорциональную среднеквадратическому отклонению волнового фронта. Приближенная формула достаточно точна, погрешность составляет 1..2%, если относительная освещенность не менее 0,75.

Если принять, что волновая aberrация понижает освещенность в центре дифракционного пятна на 20%, что почти не влияет на качество, то и из (6.5) получим известный критерий Марешаля

$$W_{СКВ}^2 \leq \lambda^2 / 196, W_{СКВ} \leq \lambda / 14 \quad (6.6)$$

Этот критерий означает, что среднеквадратичное отклонение волнового фронта относительно оптимальной сферы не должно превышать  $\lambda/14$ .

5. *Полихроматическое среднеквадратическое отклонение волнового фронта  $W_{\Sigma СКВ}$ .* Полихроматическую среднеквадратическую волновую aberrацию можно определить интегрированием по спектральному интервалу монохроматического волнового фронта  $W_{СКВ}$ :

$$W_{\Sigma СКВ} = \left[ \frac{1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^1 W^2(\rho, \varphi, \chi) \rho d\rho d\varphi d\chi - \frac{1}{\pi^2} \left[ \int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^1 W(\rho, \varphi, \chi) \rho d\rho d\varphi d\chi \right]^2 \right]^{0,5},$$

где вместо длины волны  $\lambda$ , введена безразмерная относительная спектральная координата  $\chi$ , изменяющаяся от - 1 до +1,  $\chi = (\lambda - \lambda_0) / \Delta\lambda$ , где  $\lambda_0 = 0,5 (\lambda_{\max} + \lambda_{\min})$  – средняя длина волны;  $\Delta\lambda = 0,5 (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})$  – полуширина рабочего спектрального интервала.

При расчете предполагается, что функция спектральной эффективности постоянна во всем спектральном интервале.

## 6.6. Частотно-контрастная характеристика

Процесс образования оптического изображения можно рассматривать подобно передаче сигналов линейными электрическими элементами. Название ОПФ – по аналогии с передаточной функцией линейных радиотехнических элементов. ОПФ описывает формирование предмета от максимальных элементов до минимальных, контраст которых близок к нулю. ОПФ – наиболее информативный критерий качества, позволяющий оценить два параметра изображения:

- количество сформированных элементов с соответствующим контрастом,
- качественное соответствие геометрического положения элементов изображения по отношению к предмету.

*Первый параметр* определяется функцией передачи модуляции (ФПМ) (ранее называлась частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ)),

*второй* – функцией передачи фазы (ФПФ) (ранее называлась частотно-фазовой характеристикой (ЧФХ)). Обе эти функции можно получить из ОПФ, которую применяют для оценки качества систем с высокими оптическими характеристиками. Выполнив различные преобразования ОПФ, можно получить частные критерии, включая известные классические критерии Рэля и Штреля, применяемые для оценки качества изображения высококачественных систем с небольшим угловым полем.

*Частотно-контрастная характеристика* (МТФ) – один из основных параметров оценки качества ОС, показывающий, насколько резкие изображения способен формировать объектив (рис. 6.4).

Значение ЧКХ зависит от пространственной частоты деталей сформированного изображения, измеряемой в количестве строк на миллиметр.

Вывод частотно-контрастной характеристики возможен либо в виде двумерной функции для всех направлений частот. Настройка способа отображения производится в поле «Вид отображения». Все настройки соответствуют работе «Анализ функции рассеяния точки».

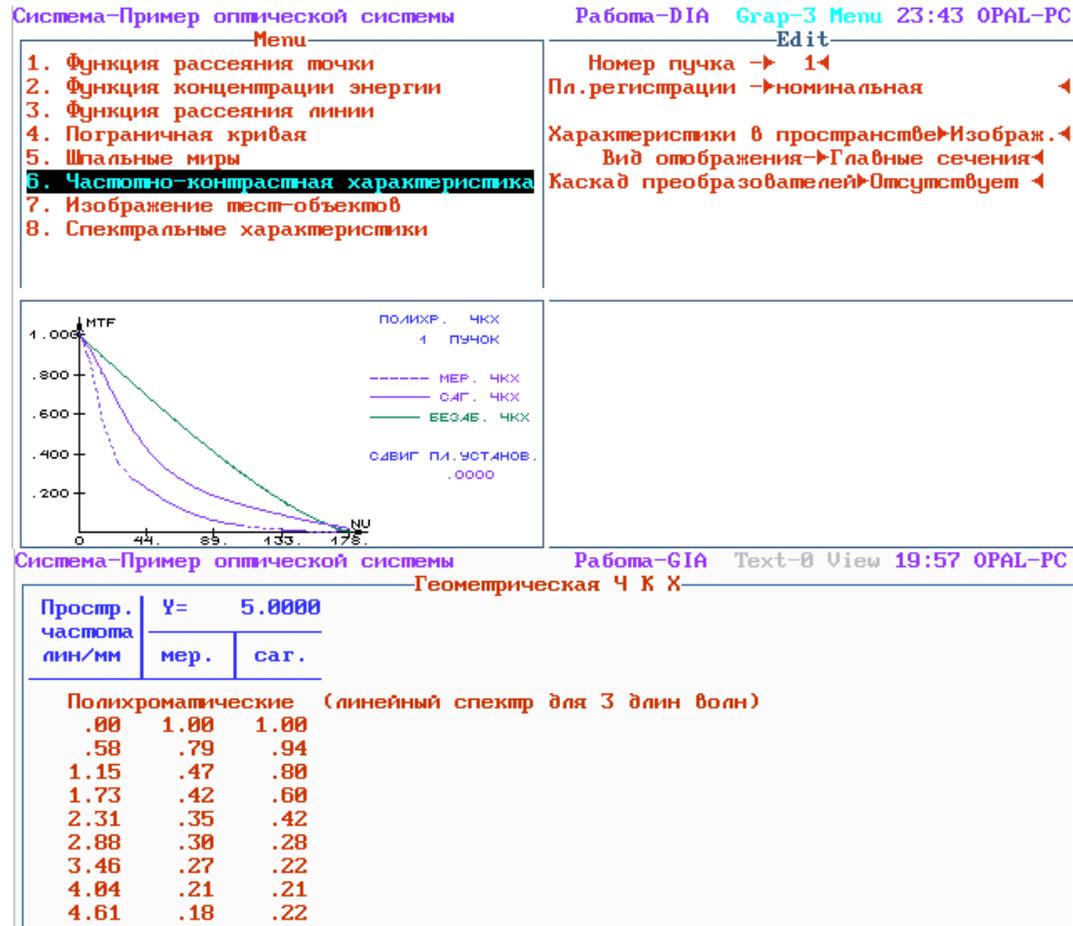


Рис. 6.4. Частотно-контрастная характеристика

Геометрическая частотно-контрастная характеристика рассчитывается для 20 значений пространственных частот до частоты, заданной пользователем (поле «Пространственная частота»). Вывод результатов возможен в виде графика или таблицы. В графической форме для справки выводится безабберационная ЧКХ, определяемая с учетом дифракции.

ЧКХ дает количественную оценку контраста в изображении структур предметов различных частот и его качества. Разрешающая способность (*с точки зрения ЧКХ*) – это частота в изображении периодически расположенных объектов (светящихся точек или штрихов миры), при которой контраст между изображениями объектов и окружающим их фоном находится на границе контрастной чувствительности приемника (глаза, фотоэлемента и т.д.), воспринимающего изображение. ЧКХ является составной частью ОПФ и определяет отношение контраста изображения  $k'$  к контрасту предмета  $k$  в зависимости от частоты точек предмета  $k(N) = \frac{k'}{k}$ .

Наиболее просто ЧКХ определить, если в качестве предмета используют синусоидальную миру, штрихи которой имеют синусоидальное распределение яркости (изображение миры также имеет  $\sin$  распределение освещенности). Яркость миры меняется от 0 до  $L_{\max}$  (какой-то  $\max$  величины).  $k = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}$ .

Тогда ЧКХ – зависимость контраста изображения  $\sin$  миры от ее пространственной частоты при контрасте самой миры, равной 1. Если  $L_{\min}=0$ ,  $k=1$ . Чем больше частота  $\nu$  миры ( $\nu = \frac{1}{e}$ ), тем сильнее падает контраст. Для каждой ОС существует граничная частота, для которой  $T(\nu_{\text{гп}}) = 0$ ; т.е. для всех  $\nu \geq \nu_{\text{гп}}$  имеем  $T(\nu) = 0$ .

$$\begin{cases} \nu_{\text{гп}} = \frac{2 \sin \sigma'}{\lambda}; & S \neq \infty \\ \nu_{\text{гп}} = \frac{D}{\lambda \cdot f'}; & S = \infty. \end{cases} \quad (6.7)$$

Пример:

$$\lambda = 546 \text{ нм}, \quad D/f' = 1:5; \quad \nu_{\text{гп}} = 400 \text{ 1/мм.}$$

Различают дифракционную и геометрическую ЧКХ. ДЧКХ имеет смысл применять для хорошо исправленных систем ( $\lambda - 2\lambda$ ), или если aberrации изображения точки не превышают ее дифракционного изображения. Когда  $\nu \ll \nu_{\text{гп}}$  можно ограничиться ГЧКХ. Полихроматическая ЧКХ имеет смысл только для зеркальных систем и для тех линзовых, у которых хорошо исправлен хроматизм увеличения ( $y'_{\lambda_1} - y'_{\lambda_2} \leq 0,02$  приблизительно).

Общая ЧКХ для сложной системы с различными приемниками определяется, как произведение ЧКХ отдельных ее компонентов и приемников. По графикам ЧКХ фотообъектива и функции порогового контраста фотопленки можно определить фотографическую разрешающую способность с учетом фотослоя (рис. 6.5).

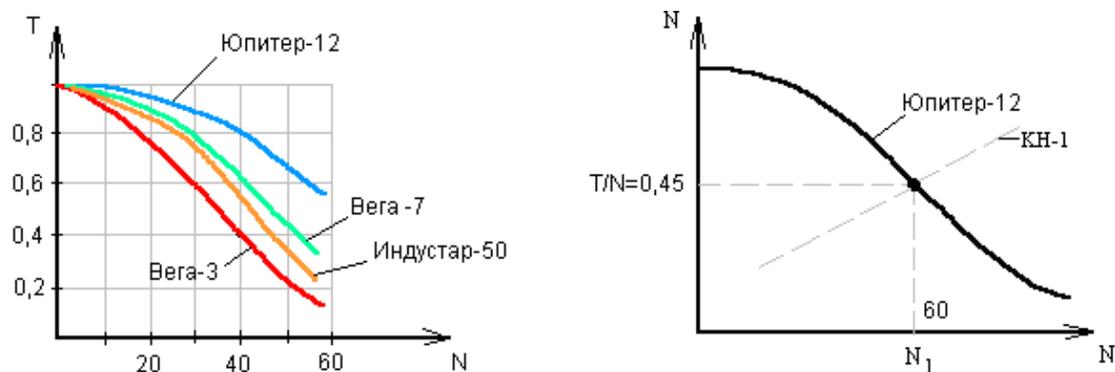


Рис.6.5

### 6.7. Точечная диаграмма лучей

Точечная диаграмма лучей ТД – картина точек пересечения лучей, равномерно распределенных по зрачку, с плоскостью изображения (рис. 6.6). ТД может выводиться для одного пучка или для всех пучков.

При выводе точечной диаграммы для одного пучка выводится рамка: по клавише «Space» выделенная часть изображения отобразится на все окно, по клавише «Enter» производится расчет концентрации энергии в прямоугольнике с размерами рамки. Могут быть выведены для справки значения размеров окна и размеров и положения рамки в плоскости изображения справа.

Все настройки этого пункта стандартные для работы «Анализ геометрического изображения».

Фокусировочные диаграммы характеризуют изменение точечных диаграмм при сдвиге плоскости изображения. Для всех пучков выводятся ТД для номинальной плоскости установки и для четырех сдвинутых на расстояния  $\pm DS'$  и  $\pm 2 \cdot DS'$  плоскостей. Величина сдвига  $DS'$  задается в поле «Шаг по расфокусировке» окна «Edit» (рис.6.6). Остальные настройки этого пункта стандартные для работы «Анализ геометрического изображения».



Рис.6.6. Точечная диаграмма

## 6.8. Функция рассеяния линии и пятно рассеяния

*Сканирование пятна рассеяния.* В этом пункте отображается топограмма пятна рассеяния. «Шаг сканирования» определяет минимальный размер элемента этой картины.

*Среднеквадратические размеры пятна рассеяния СКВ* выводятся в табличной форме ( $X_{скв}$ ,  $Y_{скв}$ ); дополнительно положение энергетического центра пятна ( $Y_{цэ}$ ). По их значениям можно оценить размеры пятна в меридиональном и сагиттальном направлениях (рис.6.7). Все настройки стандартны для работы «Анализ геометрического изображения».

*Функция рассеяния линии ФРЛ* представляет собой распределение интенсивности в изображении ОС бесконечно длинной линии в меридиональном или сагиттальном сечении (рис. 6.8).

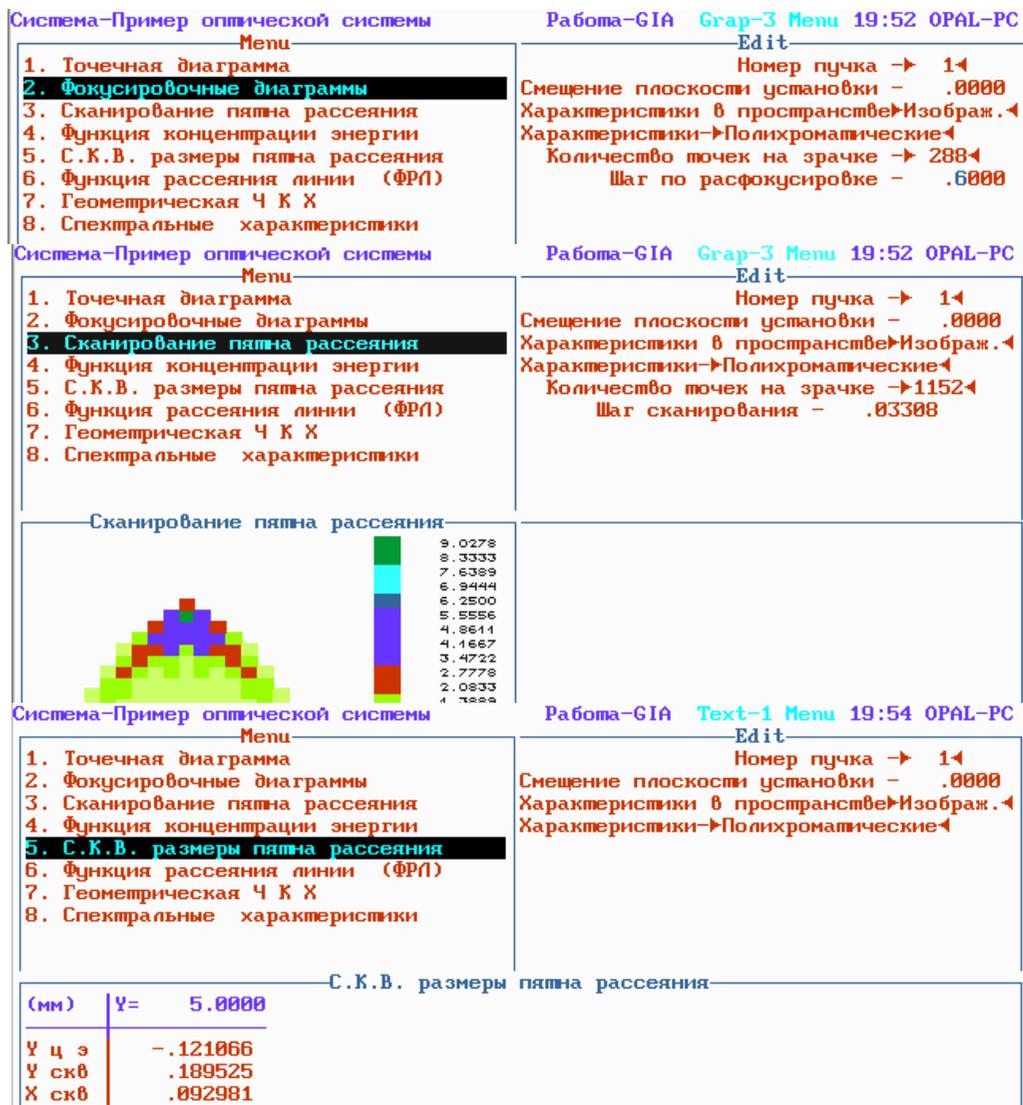


Рис. 6.7. Окно «Edit»

Все настройки этого пункта стандартные для работы «Анализ геометрического изображения». Вывод возможен в графическом и текстовом режимах.

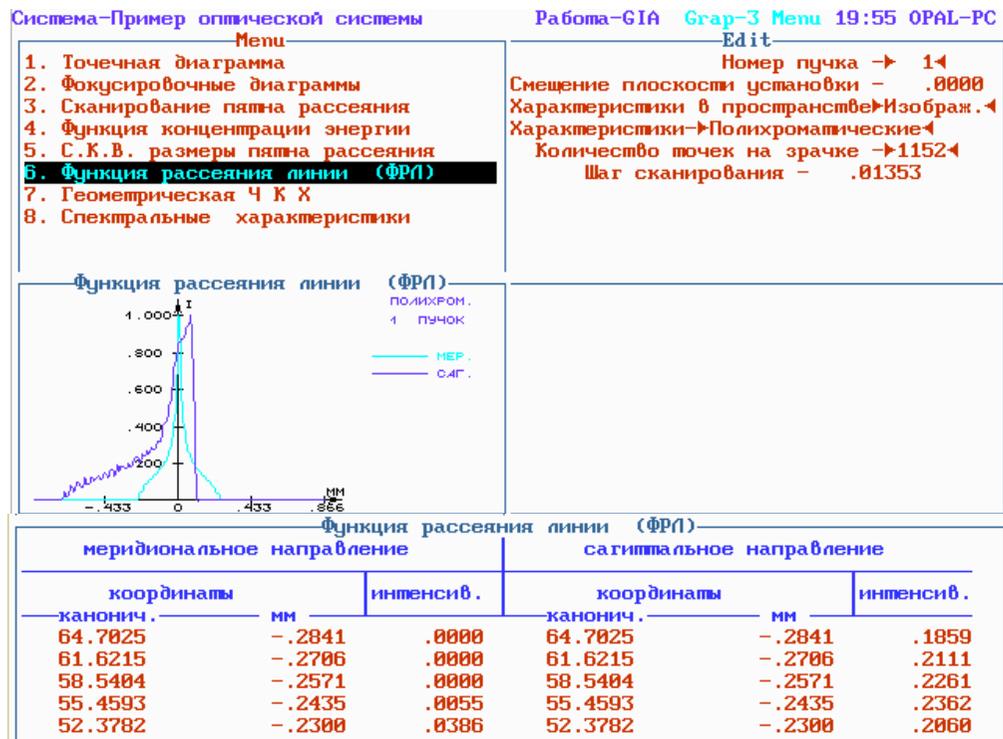


Рис. 6.8. Функция рассеяния линии

*Спектральные характеристики.* В окне «Edit» можно задать способ вычисления полихроматических характеристик и значения спектральной эффективности. Функция спектральной эффективности показывает «вес» данной длины волны в вычисляемой полихроматической характеристике. Для режима «Спектральный диапазон <непрерывный>» определяют максимальную и минимальную рабочую длину волны, которую задают в работе «Формирование». Центральная длина волны в этом случае лежит в середине диапазона. Если «Спектральный диапазон <дискретный>», то полихроматические характеристики определяются как средневзвешенные с весом, равным спектральной эффективности по заданным длинам волн.

## РАЗДЕЛ 2. СИНТЕЗ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### 7. ТЕОРИЯ КОЛЛЕНИАРНОСТИ И ОПТИКА ГАУССА ВДОЛЬ ГЛАВНОГО ЛУЧА

#### 7.1. Главные фокусные расстояния

В теории синтеза оптических систем рассматривается предметное пространство, расположенное в окрестностях главного луча, принятого за новую оптическую ось ( $\omega$  и  $\omega'$  – углы главного луча с осями  $OZ$  и  $O'Z'$  в соответствующих пространствах). При этом элементы предмета  $dy$  и изображения  $dy'$  перпендикулярны осям  $OZ$  и  $O'Z'$  и определяют линейное (поперечное) увеличение  $\frac{dy'}{dy} = \beta$ . Сопряженные точки  $H$  и  $H'$ , в которых  $\beta=1$ , называются главными. Отрезки от главных точек  $H$  и  $H'$  до фокусов вдоль главного луча называются *главными фокусными расстояниями* ( $f$ ;  $f'$ ), а расстояния от фокусов до элементов предмета и изображения  $z$  и  $z'$ .

Имеем формулы

$$-\beta = -\frac{dy'}{dy} = \frac{f}{z} = \frac{z'}{f'}$$

откуда получаем формулу Ньютона для главных фокусных расстояний  $zz' = ff'$ .

#### 7.2. Угловое увеличение. Узловые фокусные расстояния

Главные фокусные расстояния отсчитываются от главных точек, величина их изменяется с изменением положения этих точек, зависящих от выбора системы координат. Узловые фокусные расстояния отсчитываются от узловых точек (точки отсчета, положение не зависит от системы координат). Угловое увеличение равно отношению приращений углов главного луча с оптической осью

$$\gamma = \frac{dw'}{dw} = \frac{z + f}{z' + f'} \cdot \frac{\cos w'}{\cos w},$$

Имеем  $z' = f' \cdot \beta$ , далее используем формулу Ньютона:

$$\gamma = \frac{\frac{f \cdot f'}{z' + f'} + f}{\frac{z}{z' + f'}} \cdot \frac{\cos \omega'}{\cos \omega} = \frac{f}{z'} \cdot \frac{f' + z'}{z' + f'} \cdot \frac{\cos \omega'}{\cos \omega} = \frac{f}{z'} \cdot \frac{\cos \omega'}{\cos \omega} = \frac{z}{f'} \cdot \frac{\cos \omega'}{\cos \omega}.$$

После преобразований, получим рабочие формулы:

$$\begin{aligned} \gamma &= -\frac{f}{f' \cdot \beta} \cdot \frac{\cos \omega'}{\cos \omega}, \\ \beta \gamma &= -\frac{f}{f'} \cdot \frac{\cos \omega'}{\cos \omega} = \text{const}. \end{aligned} \tag{7.1}$$

Линейное увеличение в узловых точках, когда  $\gamma_N=1$ , будет равно  $\beta_N = -\frac{f}{f'} \cdot \frac{\cos \omega'}{\cos \omega}$ .

Обозначим расстояния от фокусов до узловых точек через  $z_N$  и  $z'_N$ . Это и есть узловые фокусные расстояния:

$$\begin{aligned} z_N &= -\frac{f}{\beta_N} = \frac{f' \cos w}{\cos w'} = -\underline{f}; \\ z'_N &= -f' \beta_N = \frac{f \cos w'}{\cos w} = -\underline{f'} \end{aligned} \tag{7.2}$$

Перемножая формулы (7.2), приходим к равенству, выражающему связь между главными и узловыми фокусными расстояниями.

$$\underline{f f'} = \underline{ff'} = \text{const}. \tag{7.3}$$

### 7.3. Инвариант Лагранжа-Гельмгольца

Развернем формулу (7.1) и выразим через элементарные приращения:

$$\frac{f'}{\cos \omega'} dy' d\omega' = -\frac{f}{\cos \omega} dy \cdot d\omega. \quad (7.4, a)$$

Формула (7.4,а) выражает инвариант Лагранжа-Гельмгольца через главные фокусные расстояния. Используя формулу (7.2) получим инвариант Лагранжа-Гельмгольца через узловые фокусные расстояния:

$$\frac{dy'}{f'} \cos \omega' d\omega' = -\frac{dy}{f} \cos \omega \cdot d\omega. \quad (7.4, б)$$

### 7.4. Меридиональный и сагиттальный инварианты Гульстранда-Юнга

Инварианты описывают узкий пучок лучей, проходящий через сферическую преломляющую поверхность. *Меридиональный инвариант Аббе-Юнга (Гульстранда-Юнга).*

$$\frac{n' \cos^2 \varepsilon'}{t'_m} - \frac{n' \cos \varepsilon'}{r} = \frac{n \cos^2 \varepsilon}{t_m} - \frac{n \cos \varepsilon}{r} \quad (7.5.)$$

Для малых углов падения, которые представляют собой параксиальную область, инвариант Гульстранда-Юнга преобразуется в инвариант Аббе.

*Сагиттальный инвариант Аббе-Юнга.*

Положение сагиттального изображения определяется точкой пересечения преломленного луча с прямой,

проходящей через предметную точку и центр преломляющей поверхности.

Для сагиттального пучка лучей инвариант имеет вид

$$\frac{n'}{t'_S} - \frac{n' \cos \varepsilon'}{r} = \frac{n}{t_S} - \frac{n \cos \varepsilon}{r} \quad (7.6)$$

Выражения (7.6) и (7.5) позволяют получить общую формулу:

$$\frac{n' \cos^2 \varepsilon'}{t'_m} - \frac{n \cos^2 \varepsilon}{t_m} = \frac{n'}{t'_S} - \frac{n}{t_S} = \frac{n' \cos \varepsilon' - n \cos \varepsilon}{r} \quad (7.7)$$

Разность  $t'_S - t'_m$  называется астигматической разностью или *астигматизмом*. Если  $t_m = t_S = -\infty$ , то в этом случае отрезки  $t'_S$  и  $t'_m$  представляют собой задние фокусные расстояния астигматического пучка лучей.

$$t'_m = f'_m = \frac{n'r \cos^2 \varepsilon'}{n' \cos \varepsilon' - n \cos \varepsilon}; t'_S = f'_S = \frac{n'r}{n' \cos \varepsilon' - n \cos \varepsilon} \quad (7.8)$$

Фокусами являются элементарные отрезки, называемые фокальными линиями.

Передние фокусные расстояния определяются для  $t'_m = t'_S = \infty$  формулами

$$f_m = t_m = -\frac{nr \cos^2 \varepsilon}{n' \cos \varepsilon' - n \cos \varepsilon}; f_S = t_S = -\frac{nr}{n' \cos \varepsilon' - n \cos \varepsilon} \quad (7.9)$$

Обобщенная формула инварианта	$\frac{n' \cos^2 \varepsilon'}{t'_m} - \frac{n \cos^2 \varepsilon}{t_m} = \frac{n'}{t'_S} - \frac{n}{t_S} = \frac{n' \cos \varepsilon' - n \cos \varepsilon}{r}$	7.7
Фокусное расстояние в меридиональной и сагиттальной плоскости	$t'_m = f'_m = \frac{n'r \cos^2 \varepsilon'}{n' \cos \varepsilon' - n \cos \varepsilon}; \quad t'_S = f'_S = \frac{n'r}{n' \cos \varepsilon' - n \cos \varepsilon}$	7.8
Связь фокусных расстояний	$\frac{f'_m}{t'_m} + \frac{f_m}{t_m} = 1; \quad \frac{f'_S}{t'_S} + \frac{f_S}{t_S} = 1$	7.8, a

### 7.5. Анастигматические поверхности

Поверхность называется *анастигматической* при отсутствии астигматизма

Условие анастигматичности	$t_m = t_S = t, \quad t'_m = t'_S = t'$ $\frac{n'}{t'} = \frac{n' \cos \varepsilon' - n \cos \varepsilon}{r \cos^2 \varepsilon'} + \frac{n \cos^2 \varepsilon}{t \cos^2 \varepsilon'} = \frac{n' \cos \varepsilon' - n \cos \varepsilon}{r} + \frac{n}{t}$	7.9
Формула инварианта	$nt = n't' = \frac{(n'^2 - n^2)r}{n' \cos \varepsilon' - n \cos \varepsilon}$	7.10
Случай отражения	$\cos \varepsilon \left( \frac{1}{t'_m} + \frac{1}{t_m} \right) = \frac{1}{\cos \varepsilon} \left( \frac{1}{t'_S} + \frac{1}{t_S} \right) = \frac{2}{r}$	7.11

## 8. БАЗОВЫЕ (СИЛОВЫЕ) ЭЛЕМЕНТЫ

Базовые элементы решают задачу обеспечения внешних требований (габариты, увеличение, поле зрения), они создают необходимую оптическую силу, то есть обеспечивают фокусное расстояние. Простейшие базовые элементы – одиночные линзы в воздухе. Всего можно получить 16 сочетаний попарно, но практически применение нашли только 6.

### 8.1. Основные базовые элементы

Когда рассматривается работа базовых линз (рис. 8.1), ставятся условия исправления полевых aberrаций (астигматизма, комы). Кривизна изображения исправляется коррекционно-силовыми элементами.

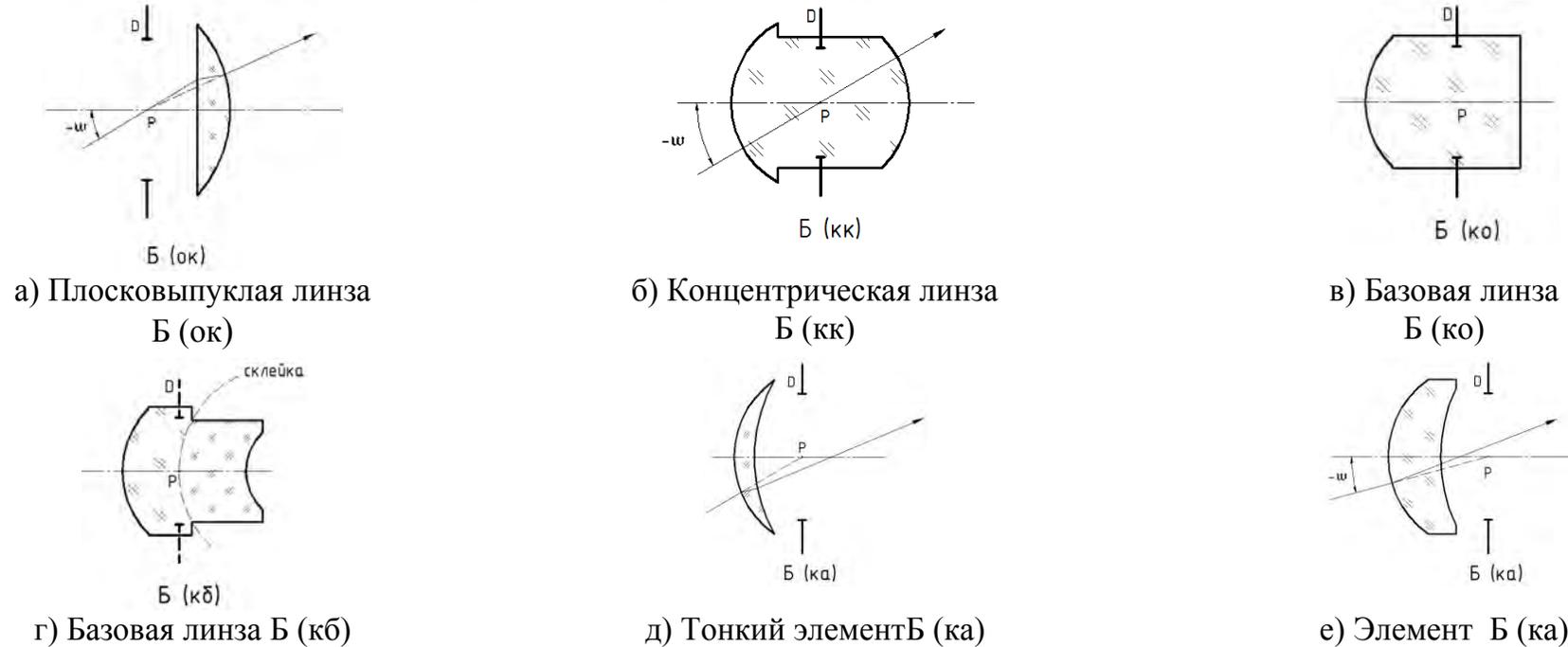


Рис. 8.1. Базовые элементы ОС

Введем обозначение «БЭ» – базовый элемент. При создании базовых линз располагают 4 видами поверхностей: а – апланатическая; б – близфокальная (вблизи изображения); к – концентричная (концентрична зрачку); о – плоская поверхность.

1) Плосковыпуклая линза Б (ок). Могут быть исправлены кома и астигматизм, когда вторая поверхность концентрична зрачку. В этом случае выходящий луч идёт по нормали к поверхности. Сферическая aberrация отрицательна и сохраняет своё значение постоянным по всему полю зрения (рис. 8.1, а).

2) Концентрическая линза Б (кк).

Концентричность относительно входного зрачка. Астигматизм и кома исправлены, сферическая aberrация меньше, чем у Б(ок). Следовательно, этот базовый элемент выгодно использовать для развития светосилы. Кроме того, возможно исправление дисторсии (рис. 8.1, б).

3) Концентрично-плоская линза Б (ко).

Первая поверхность концентрична входному зрачку и полностью свободна от комы и астигматизма. Вторая поверхность может располагаться вблизи плоскости изображения, она вносит некоторый астигматизм, дисторсия отрицательна, но её легко исправить, кома мала (рис.8.1, в).

4) Базовая линза Б (кб).

Первая поверхность концентрична входному зрачку и полностью свободна от комы и астигматизма (рис. 8.1, г). Вторая поверхность выбирается таким образом, чтобы исправить кривизну изображения. Поэтому часто радиусы поверхностей равны  $r_1=r_2$ . При исправленном астигматизме  $S_{III} = 0$ , условие исправления кривизны изображения (условие Петцваля):

$$S_{IV} = -\sum_1^2 \frac{\Delta v_s}{r_s} = 0, \quad (8.1)$$

где  $\Delta v_s$  – характеристика стекла (материала линзы). Отрицательная сферическая aberrация легко исправляется склеенной поверхностью, концентричной первой поверхности. Возможно также исправление дисторсии.

5) Базовый тонкий элемент Б (ка) представлен на рис. 8.1, д.

Кривизну изображения исправляют за счёт подбора радиусов кривизны. Сферическая aberrация значительна, астигматизм исправлен.

б) Базовый элемент Б (ка) – толстая линза.

За счет равенства радиусов  $r_1=r_2$  устранена кривизна изображения. Из шести базовых элементов в Б (ка) самая большая сферическая аберрация.

Если простые базовые элементы не обеспечивают достаточного силового эффекта, то их необходимо усложнять, вводя изопланатические элементы: апланатические или концентрические поверхности.

## 8.2. Коррекционно-силовые элементы оптических систем

Коррекционно-силовые элементы влияют на оптическую силу, т.е. они могут исправлять кривизну изображения. Очевидно, что эти элементы не должны вносить ни астигматизма, ни комы. Поэтому они должны использовать такие же изопланатические поверхности, как и в базовых элементах.

### Классификация элементов.

1. Линзы Смита. Эти линзы близфокальные: расположены вблизи плоскости изображений. Обозначение – К(бо). На рис. 8.2 показано использование линзы Смита с плосковыпуклой линзой. К(бо) могут использоваться с базовыми элементами Б(ок), Б(кк), Б(ка).

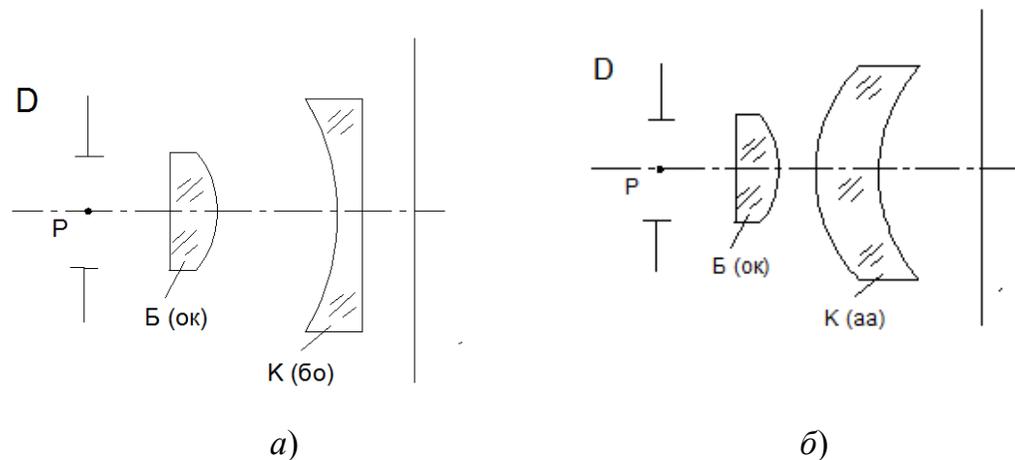


Рис. 8.2. Использование КС элементов: а) линзы Смита; б) линзы К(аа)

2. Биаканатическая линза К(аа) – элемент требует расстояния между последней базовой поверхностью и плоскостью изображений. Система имеет вынесенный зрачок, поэтому можно исправлять дисторсию.

Биаканатическая линза К(аа) часто применяется с базовыми элементами Б(ок), Б(кк).

Формула использования:

$$\begin{cases} \text{Б(ок)} + \text{К(аа)} \\ \text{Б(кк)} + \text{К(аа)} \end{cases}$$

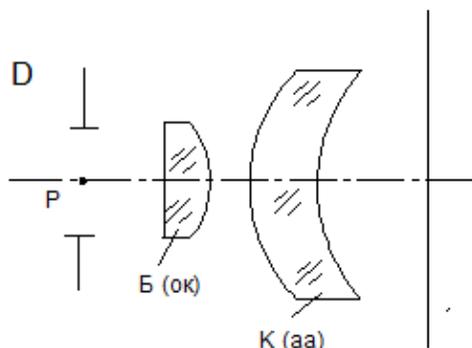


Рис. 8.3. Использование биаканатической линзы

### 3. Концентрическая линза К(кк).

Линза имеет две концентрические поверхности и используется с базовым элементом Б(ка). Имеем формулу использования:  $\text{К(кк)} + \text{Б(ка)}$ . Линзу нельзя использовать, когда поверхность изображения от предшествующей оптической системы концентрична центру выходного зрачка, т.е. Б(ок) и Б(кк).

Для исправления кривизны поля этому коррекционно-силовому элементу необходимо придавать определенную оптическую силу. Ее параметры рассчитывают из выполнения условия Пецваля (условие исправления кривизны изображения при откоррегированном астигматизме):

$$\begin{cases} S_{III} = 0 \\ S_{IV} = 0 \end{cases}$$

Такие условия выполняются варьированием одного из радиусов. При этом варьирование может влиять на сферическую aberrацию, не затрагивая исправление астигматизма и комы, в таком случае исправляются четыре основные монохроматические aberrации.

4. Плосковогнутые линзы К(ок) – модификация 3-го класса. Формулы использования: К(ок) + Б(ка); К(ко) + Б(ка). При отходе от концентричности одной поверхности мы лишаемся возможности свободно варьировать сферической aberrацией. Ее исправление возможно подбором показателей преломления.

Не выходя из рамок двухлинзовой системы можно для всех базовых элементов решить задачу исправления сферической aberrации, вводом нормальной склейки.

На рис. 8.4. представлена телеконцентрическая система Ланге. При использовании  $n_3 = n_4$  (среда) система будет строго безaberrационной, так как дополнительно исправлена дисторсия.

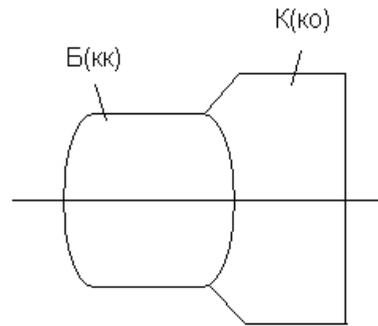


Рис. 8.4. Система Ланге

Ее конструктивные параметры:

$$r_2 = \frac{r_1}{2} \sqrt{2} \quad d = r_1 + r_2 \quad \begin{array}{l} n_1 = 1 \\ n_2 = \sqrt{2} \\ n_3 = n_2^2 = 2 \end{array}$$

## 9. КОРРЕКЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

### 9.1. Компенсаторы зеркально-линзовых систем

Компенсатор – узел, служащий для исправления аберрации БЭ без изменения оптической силы и положения изображения. Его рассчитывают как тонкую линзу, которая отождествляется с деформированной волновой поверхностью. Линзовые компенсаторы можно разделить на афокальные и ахроматические компенсаторы.

*Примеры компенсаторов:* коррекционная пластинка Шмидта; двухлинзовые компенсаторы, установленные в параллельных или сходящихся пучках; компенсатор меридиональной комы В.Н. Чуриловского; неафокальные компенсаторы – мениск Д.Д. Максудова; линзовые компоненты с отражающей поверхностью (линза Манжена, склеенный и несклеенный компоненты-отражатели) и компенсатор кривизны поля – линза Смита.

*Мениск Д.Д. Максудова* свободен от хроматизма в широкой области спектра (апохроматическая коррекция). Мениск обладает небольшой отрицательной силой и положительной сферической аберрацией

$$\Phi_M = \frac{n-1}{n+1} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (9.1)$$

Поэтому используется с вогнутым сферическим зеркалом.

Расстояние между центрами обеих поверхностей мениска

$$r_2 - r_1 + d = \frac{d}{n^2} = k, \quad (9.2)$$

невелико, благодаря этому можно, располагая материальную (апертурную) диафрагму вблизи этих центров, избежать возникновения большого астигматизма и комы.

Изменяя соотношение радиусов и толщину мениска, можно варьировать его сферической аберрацией, т.е. при помощи мениска представляется возможным корригировать отрицательную сферическую аберрацию зеркала, практически не затрагивая других аберраций системы. Исправление сферической аберрации осуществляется для какой-то одной высоты апертурного луча осевого пучка. Этим ограничивается возможное развитие относительного отверстия в зеркально-линзовых системах подобного рода.

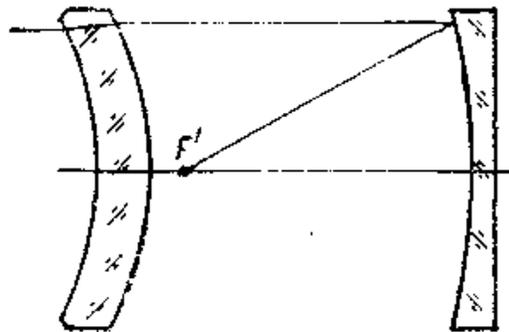


Рис. 9.1 Сферическое зеркало с мениском Максудова Д.Д.

**Компенсатор афокальный.**

Применять афокальный компенсатор в сходящемся пучке после главного (первичного) зеркала имеет смысл только тогда, когда его абберация уже исправлена путем применения асферической поверхности. Двухлинзовый компенсатор может менять свою форму (рис. 9.2, а).

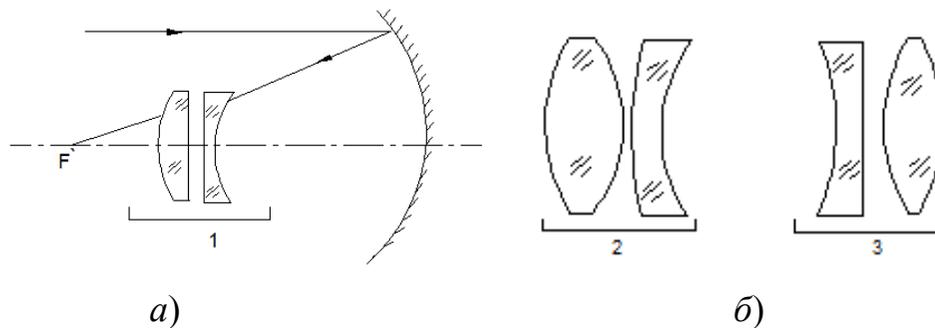


Рис. 9.2. Использование двухлинзового компенсатора в сходящемся пучке:  
а) базовая схема; б) варианты компенсаторов

**Компенсатор – толстая плоскопараллельная пластина (ППП).**

Сферическое зеркало обладает отрицательной сферической aberrацией, плоскопараллельная пластинка, наоборот, имеет положительную сферическую aberrацию. Поэтому, сочетая сферическое зеркало с ППП определенной толщины, можно осуществить взаимную компенсацию сферической aberrации. Отметим, что сферическая aberrация  $\Delta S'$  зависит от показателя преломления. Используется стекло: СТК 19, ТФ 10, СТФ 1. При этом волновая aberrация  $\Delta l < 0,1\lambda$ .

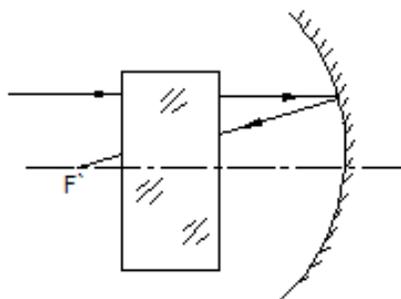


Рис. 9.3. Использование ППП в параллельном и сходящемся пучке одновременно

Обычно стремятся откоррегировать (выполнить компенсацию) сферической aberrации в средней зоне входного зрачка. При этом возможно развить большое относительное отверстие и получить светосильную систему, где относительное отверстие порядка 1:1. Базовую схему с ППП можно усложнять используя мениски или толстые линзы.

**Компенсатор Чуриловского В.Н.** афокальный и апохроматический, выполняется обычно из двух линз, выполненных из стекла одной марки. Одним апохроматическим корректором можно устранить сферическую aberrацию и кому, а двумя корректорами можно устранить все aberrации. Недостатки схем: несмотря на высокое качество коррекции вторичного спектра, системы имеют большой астигматизм, необходимо значительно отодвигать корректор от вторичного зеркала, чтобы пропустить крайние лучи. Система с двумя корректорами сложна в юстировке.

## 9.2. Аномальные и нормальные склейки. Ориентация и использование склеек для коррекции астигматизма

Склеенные поверхности разделяют среды, показатели преломления которых близки друг к другу.

Так, для склеек разница показателей преломления для граничащих сред составляет  $\Delta n = 0,1 \div 0,2$ . На границе раздела стекло-воздух:  $\Delta n = 0,5 \div 0,7$ .

### *Астигматизм склейки.*

Для расчета астигматизма используются инварианты Гульстранда-Юнга.

При малых разностях показателей преломления  $\Delta n$  будет малая разность углов падения и преломления луча  $\varepsilon' = \varepsilon + \Delta\varepsilon$ , поэтому имеет смысл определять меридиональную и сагиттальную оптические силы склеенной поверхности:

$$\Phi_t = \frac{n'}{t'} - \frac{n}{t} \quad \text{и} \quad \Phi_s = \frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} \quad (9.3)$$

Из выражения закона преломления для склейки, получим соотношения:

$$\Delta n \sin \varepsilon = -n \cos \varepsilon \Delta \varepsilon$$

$$\Delta \varepsilon = -\frac{\Delta n}{n} \operatorname{tg} \varepsilon$$

Используя инвариант (9.3), можно получить выражение:

$$\Phi_t \cos^2 \varepsilon = \frac{\Delta n}{r \cos \varepsilon} = \Phi_s \quad (9.4)$$

При малых углах  $\varepsilon = \varepsilon' = 0$  рассчитывается оптическая сила поверхности склейки на оси

$$\Phi_o = \Phi_s = \Phi_t = \frac{\Delta n}{r} \quad (9.5)$$

Тогда имеем соотношение, определяющее связь оптических сил:

$$\Phi_t = \frac{\Phi_o}{\cos^3 \varepsilon}; \quad \Phi_s = \frac{\Phi_o}{\cos \varepsilon} \quad (9.6)$$

С ростом углов преломления оптические силы (меридиональные и сагиттальные) будут быстро возрастать по отношению к силе на оси, что видно из графиков, представленных на рис. 9.7.

**Ориентировка склеенной поверхности** устанавливает связь между углом падения  $\varepsilon$  и углом поля зрения.

Склейка *обратной* ориентировки (обращение преломляющей поверхности выпуклой стороной к зрачку):

$$\frac{s_p}{r} < 0; |\sin \varepsilon| > |\sin \omega|$$

Склейка *прямой* ориентировки (обращение преломляющей поверхности вогнутой стороной к зрачку):

$$0 < \frac{s_p}{r} < 2; |\sin \varepsilon| < |\sin \omega| \text{ – склейка значительно удалена от зрачка.}$$

Случай, когда  $\frac{s_p}{r} > 2; |\sin \varepsilon| > |\sin \omega|$  дает склейку прямой ориентировки.

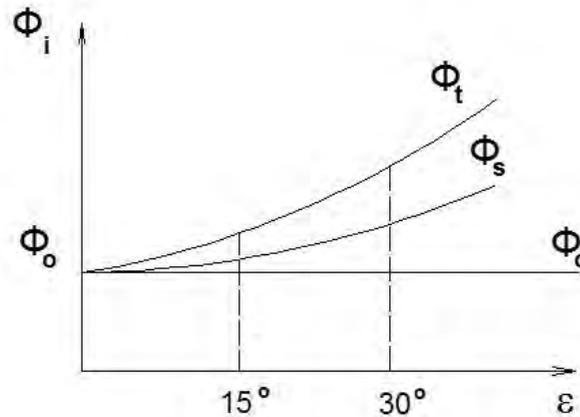


Рис. 9.7. Зависимость оптических сил поверхности склейки от угла падения

**Нормальная склейка** – склейка с отрицательной оптической силой по оси. Когда  $\varepsilon' > \varepsilon; \Delta\varepsilon > 0$ .

**Аномальная склейка** – склейка с положительной оптической силой по оси.  $\Phi_0 > 0$ ;  $\varepsilon' < \varepsilon$ ;  $\Delta\varepsilon < 0$ ;  $r > 0$ .

*Обратная ориентировка* (рис. 9.8, а):

1.  $n_1 > n_2$ ;  $\Phi_0 < 0$  – нормальная склейка;
2.  $n_1 < n_2$ ;  $\Phi_0 > 0$  – аномальная склейка.

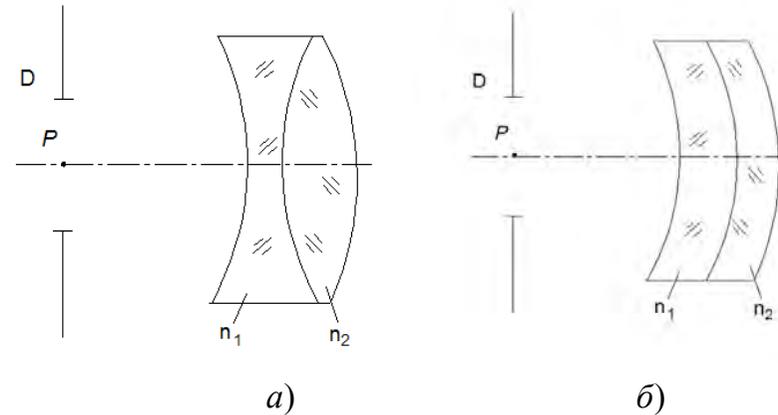


Рис. 9.8: а) склейка обратной ориентировки; б) склейка прямой ориентировки

*Прямая ориентировка* (рис. 9.8, б):

1.  $n_1 > n_2$ ;  $\Phi_0 > 0$  – нормальная склейка прямой ориентировки;
2.  $n_1 < n_2$ ;  $\Phi_0 < 0$  – аномальная склейка прямой ориентировки.

**Пример введения склеенной поверхности.**

Введем склейку в анастигматическую линзу первого рода (базовая линза), представленную на рис. 9.9, а.

При больших полевых углах необходимо убрать астигматизм (рис. 9.9, б) и, особенно, положительную кривизну, не трогая исправления астигматизма при малых углах. В таких случаях необходимо аномальная склейка обратной ориентации (ас). Она способствует устранению положительного астигматизма высших порядков. Такая склейка перемещает анастигматический зрачок до выхода его из мениска, следовательно, возможно составление симметричной системы из двух менисков. Сферическая aberrация  $\Delta S' < 0$  (рис. 9.9, в), следовательно, для исправления необходима склейка с отрицательной оптической силой  $\Phi_0 < 0$ , т.е. необходима нормальная склейка (нс).

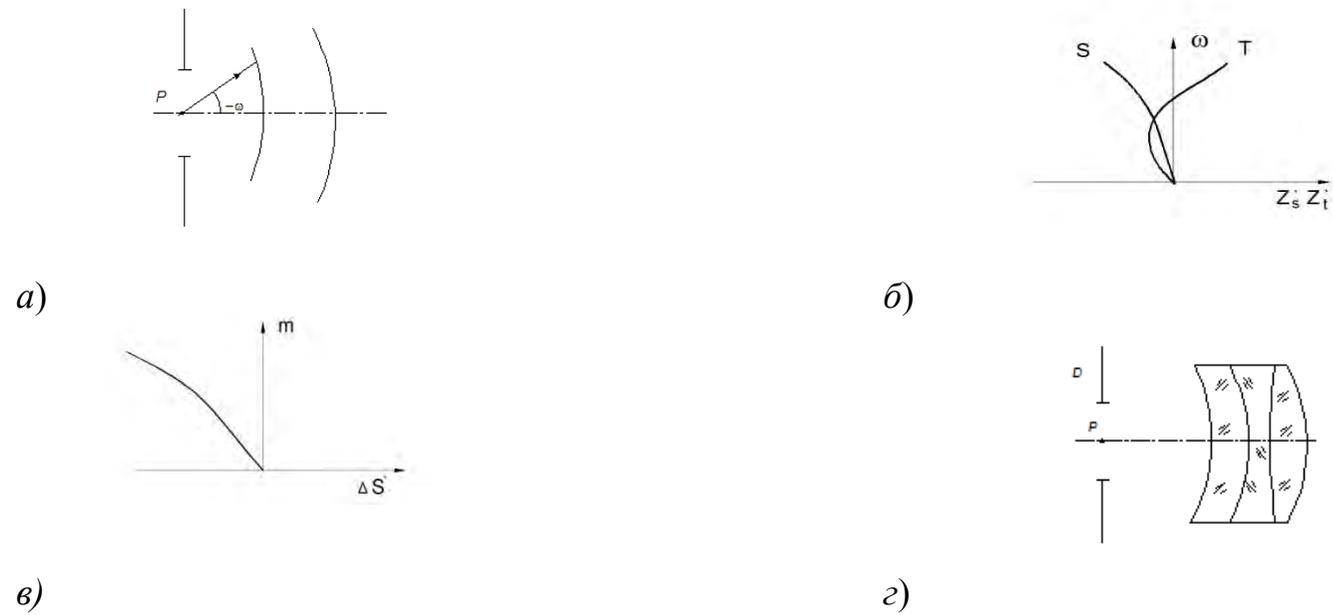


Рис. 9.9. Составление базового модуля для анастигмата: а) базовая линза; б) график астигматизма; в) график сферической aberrации; г) анастигматическая склеенная линза

При соблюдении прямой ориентации исключается влияние на астигматизм. Таким образом, получаем систему уже исправленную на астигматизм и сферическую aberrацию (рис. 9.9, г). Кому можно исправить составлением симметричной конструкции из двух скленных линз.

### 9.3. Апланатические поверхности, биакпланатические линзы

Апланатическая поверхность – оптическая поверхность, при преломлении или отражении от которой световой пучок не испытывает aberrационных искажений. В апланатических точках нет ни комы, ни астигматизма. Любым луч идущий в точку  $A$  попадет в сопряженную точку  $A'$ .

### 9.3.1. Апланатические точки

Для сферической преломляющей поверхности имеем три пары сопряженных точек, в которых не нарушается гомоцентричность пучка, преломленного сферической поверхностью. Эти точки называются *апланатическими*. Для зеркальных сферических поверхностей третья пара апланатических точек совпадает с первой.

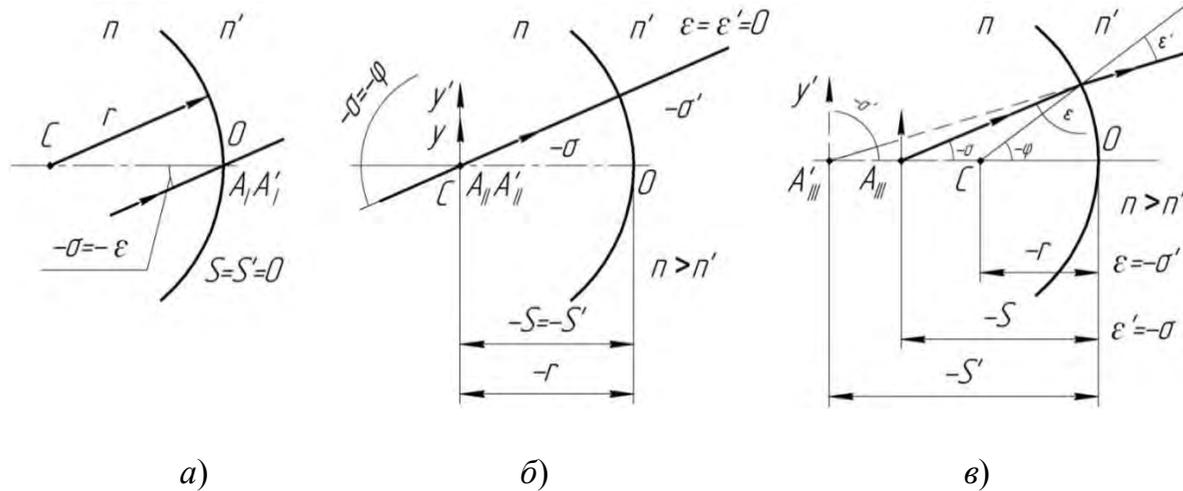


Рис. 9.10. Расположение трех пар апланатических точек

Первая пара апланатических точек: <i>точки в вершине поверхности</i>	1. Если $\sigma = \varepsilon, S' = S = 0$	(рис. 9.10, а)
Вторая пара апланатических точек: <i>концентрические точки</i>	2. Если $\varepsilon = \varepsilon' = 0$ , то $\sigma' = \sigma$ ; $S = S' = r$ $\frac{\sin \sigma}{\sin \sigma'} = 1 = const.$	(рис. 9.10, б)
Третья пара апланатических точек	3. Если $\sigma = -\varepsilon'$ , то $\sigma' = -\varepsilon$ , $\frac{\sin \sigma}{\sin \sigma'} = \frac{n}{n'} = const.$ $S = r \frac{n+n'}{n} = r + r \frac{n'}{n}$ ; $S' = r \frac{n+n'}{n'} = r + r \frac{n}{n'}$	(рис. 9.10, в)

### 9.3.2. Биопланатическая линза

**Биопланатическая линза** – линза, состоящая из двух апланатических поверхностей с разными радиусами.

Построение биопланатической линзы возможно осуществить *графо-аналитическим методом*. Построение производится для внеосевых точек. Имеем алгоритм для построения:

1.  $n_1 = n_3 = 1$ ;
2.  $h_1 = -\frac{1}{n} y$  ;  $h_2 = -ny' = -\frac{1}{n} y$  ;
3.  $C_1 C_2 = k$  ;
4.  $y' = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 y$  ;  $y'' = \left(\frac{n_2}{n_3}\right)^2 y' = y$  .

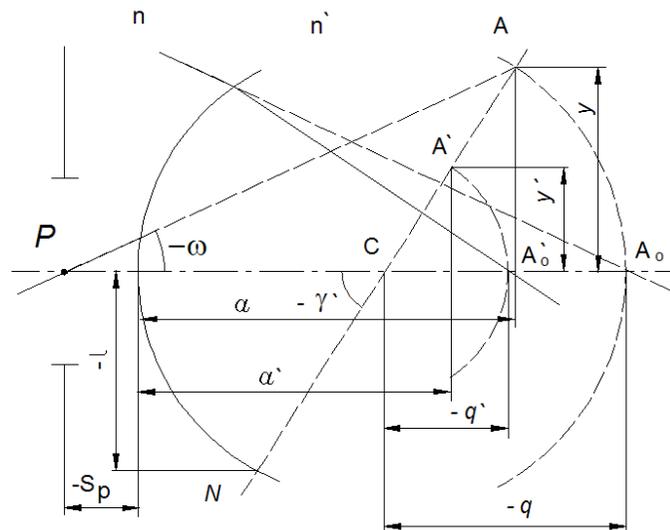


Рис. 9.11. Графоаналитический метод построения апланатической поверхности для внеосевой точки

При наличии разных радиусов, кривизна поля изображения не равна нулю, следовательно, такая биапланатическая линза будет являться средством для исправления кривизны изображения базовых систем).

В апланатической внеосевой точке линейное увеличение равно единице  $\beta=1$ , поэтому  $y''=y$ . Но в точке на оси  $\beta_0 \neq 1$ , следовательно, на оси *биапланатическая линза* обладает некоторой дисторсией. Линза исправлена на сферическую aberrацию.

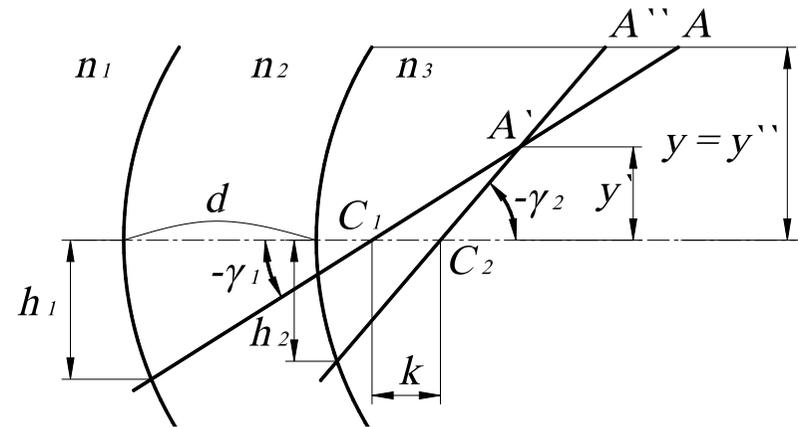


Рис. 9.12. Композиция из двух апланатических поверхностей

## РАЗДЕЛ 3. КОМПОЗИЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

### 10. СВЕТОСИЛЬНЫЕ ОБЪЕКТИВЫ

Быстрое увеличение числа ОС, обеспечивающих устранение требуемых aberrаций, при увеличении числа линз в этих системах представляет известные затруднения. Поэтому, чтобы избежать изучения малоперспективных оптических систем, остановимся на ряде основных конструктивных схем, достаточно хорошо зарекомендовавших себя на практике.

#### 10.1. Двойные склеенные анастигматы

*Двойные склеенные анастигматы* – группа объективов симметричного типа.

В базовых линзах 2Б (ан I) при соблюдении условия Петцваля ближнее положение анастигматического зрачка углубляется внутрь линзы, делая невозможным составление симметричной системы. Вводя в такие анастигматические линзы аномальные склеенные поверхности с обратной ориентировкой, способствующие устранению положительного астигматизма высшего порядка (или отрицательного астигматизма в средней части поля), наблюдаем тенденцию к некоторому удалению ближнего положения анастигматического зрачка, вплоть до его выхода из тела мениска. Это делает возможным составление симметричной системы из двух таких менисков с аномальными склейками, исправленной на астигматизм, кому и кривизну поля. Для устранения отрицательной сферической aberrации вводят в мениски нормальные склейки, обладающие положительной сферической aberrацией при соблюдении прямой ориентировки, что исключает влияние нормальной склейки на исправление астигматизма.

Подобного рода мениски с двумя склейками составляют группу симметричных двойных склеенных анастигматов. Такие объективы (рис. 10.1 и 10.2) могут быть зашифрованы в виде:

$$2Б (ан I + \overleftarrow{nc} + \overrightarrow{ac}) \text{ или } 2Б (ан I + \overrightarrow{ac} + \overleftarrow{nc}),$$

Стрелка вверху указывает на ориентировку поверхности; стрелка, направленная влево, определяет *прямую ориентировку*, и стрелка, направленная вправо, – *обратную ориентировку* склеенной поверхности.

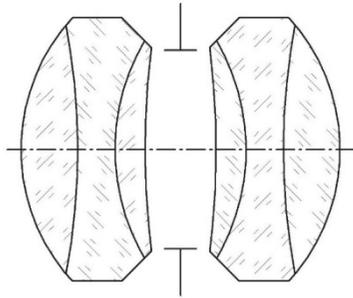


Рис. 10.1. Объектив “Дагор”

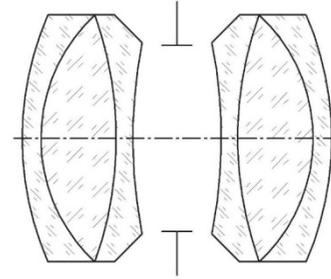


Рис.10.2. Объектив “Двойной протар”

Для *нормальной склейки*, обладающей отрицательной оптической силой, при прямой ориентировке меньший показатель преломления должен быть у среды, расположенной с вогнутой стороны преломляющей поверхности, и при выбранной прямой ориентировке – будет у среды, расположенной слева от преломляющей поверхности (если рассматривать заднюю половину объектива). У *аномальной склейки* с положительной оптической силой меньший из показателей преломления должен быть у среды, расположенной с выпуклой стороны поверхности, и при обратной-ориентировке – тоже будет расположен слева. Таким образом, при любом положении склеек друг относительно друга всегда будет наблюдаться рост показателя преломления по мере удаления от материальной диафрагмы – так называемое *правило Рудольфа*.

## 10.2. Двойные четырехлинзовые анастигматы

Конструкции двойных четырехлинзовых анастигматов являются оригинальными системами, в которых используются два различных приема компоновки:

- для систем подобного рода характерно исправление нечетных аберраций за счет использования симметрии или пропорциональности двух половинок, т.е. при создании половинки симметричного объектива отпадает необходимость исправления в ней;

- подбором сил линз, входящих в половинку двойного анастигмата, исправляют кривизну изображения, т.е. выполнение условия Петцваля.

Остается решить последнюю задачу – исправление сферической аберрации.

Известно, что в ОС, построенных из двух тонких линз, при фиксированном положении диафрагмы возможно

устранение 3-х aberrаций – астигматизма, комы и кривизны поверхности изображения. Ее целесообразно использовать как базовую в качестве половинки симметричного объектива, aberrационная коррекция которой сводится к исправлению сферической aberrации в системе из двух тонких линз с равными оптическими силами (по абсолютной величине) за счёт использования двух коррекционных параметров – прогибов обеих линз. Условие устранения сферической aberrации – уравнение, связывающее две переменные и определяющее собой некоторую плоскую кривую. Выявим общий характер изменений прогибов, необходимых для исправления сферической aberrации, используя формулы aberrаций 3-го порядка.

Воспользуемся следующим выражением для первой суммы Зейделя:

$$S_1^* = \sum \left(\frac{h_K}{h_1}\right)^4 \left(Q_{SK}^2 \Delta_K \frac{1}{ns} + k_s\right),$$

определяющей собой коэффициент сферической aberrации. Выражение неудобно для практического использования; введем переменные Ланге: высоты  $h_k$  в выражения  $Q_{sk}$  и  $\Delta_K 1/ns$ .

$$h_K Q_{SK} = n_K \left(\frac{h_K}{r_K} - \frac{h_K}{s_K}\right) = n_K \left(\frac{n_{K+1} \alpha_{K+1} - n_K \alpha_K}{n_{K+1} - n_K} - \alpha_K\right)$$

или

$$h_K Q_{SK} = \frac{n \cdot n_{K+1}}{n_{K+1} - n_K} (\alpha_{K+1} - \alpha_K)$$

Полагая, что для обеих линз показатели преломления одинаковы, определим её оптические силы. Для тонкой линзы силу определяют нечётные углы  $\alpha$ .

$$\Phi_1 = \frac{\alpha_3 - \alpha_1}{h_1}; \Phi_{11} = \frac{\alpha_5 - \alpha_3}{h_{11}} = -\Phi_1.$$

Так как  $\alpha_1$  для половинки ОС должно быть равно нулю и  $\alpha_5 = 1$ , а также, что высоты  $h_1$  и  $h_{11}$  связываются через величину воздушного промежутка, то при выбранном  $\Phi_1$  или  $d$  однозначно определяется величина

$$\alpha_3 = \Phi_1$$

Чётные же углы  $\alpha$  определяют прогибы обеих линз. Таким образом, имеем уравнение второй степени, связывающее между собой величины  $\alpha_2$  и  $\alpha_4$ . Отсутствие в данной формуле членов, содержащих произведения обеих переменных  $\alpha_2$  и  $\alpha_4$ , свидетельствует о том, что оси кривых, связывающих углы  $\alpha_2$  и  $\alpha_4$ , будут параллельны координатным осям. Уравнение является уравнением гиперболы; действительная ось такой гиперболы при отрицательном  $\alpha_3$ , когда первая линза имеет отрицательную силу, будет параллельной оси  $\alpha_2$ , и, наоборот, когда угол  $\alpha_3$  положительный, действительная ось гиперболы становится параллельной оси  $\alpha_4$ .

Полагая для половинки системы  $f=1$ ;  $h_1=1$ ;  $\alpha_5=1$ , будем иметь формулу:

$$\frac{1-\alpha_3}{1-\alpha_3 d} = -\alpha_3,$$

откуда

$$1-\alpha_3 = -\alpha_3 + \alpha_3^2 d,$$

В частном случае, полагая величину  $d$  равной 0,1 фокусного расстояния, находим величину угла  $\alpha_3$

$$\alpha_3 = \pm\sqrt{1/d}. \quad \alpha_3 = \pm\sqrt{10} = \pm 3.16.$$

Для этих значений  $\alpha_3$  были определены кривые, связывающие величины углов  $\alpha_2$  и  $\alpha_4$ , которые представлены на рис. 10. 3. Точки этих кривых определяют собой равенство нулю сферической аберрации третьего порядка. Реальная сферическая аберрация в точках гипербол будет несколько отличаться от нуля. Однако, соответственно изменяя один из углов  $\alpha_2$  и  $\alpha_4$ , можно получить точки, в которых и она была бы исправлена. Совокупность таких точек даст кривые, несколько смещенные и деформированные относительно гипербол, определявших равенство нулю сферической аберрации третьего порядка. При этом общий характер зависимостей, связывающих между собой прогибы первой и второй линз, все же сохранится.

Пользуясь этими кривыми, можно для различных пар значений  $\alpha_2$  и  $\alpha_4$  находить положения анастигматических зрачков и, ограничиваясь небольшими отрицательными значениями отрезков, определить три типа половинок, состоящих из двух тонких линз с исправленным астигматизмом, кривизной поля и сферической аберрацией.

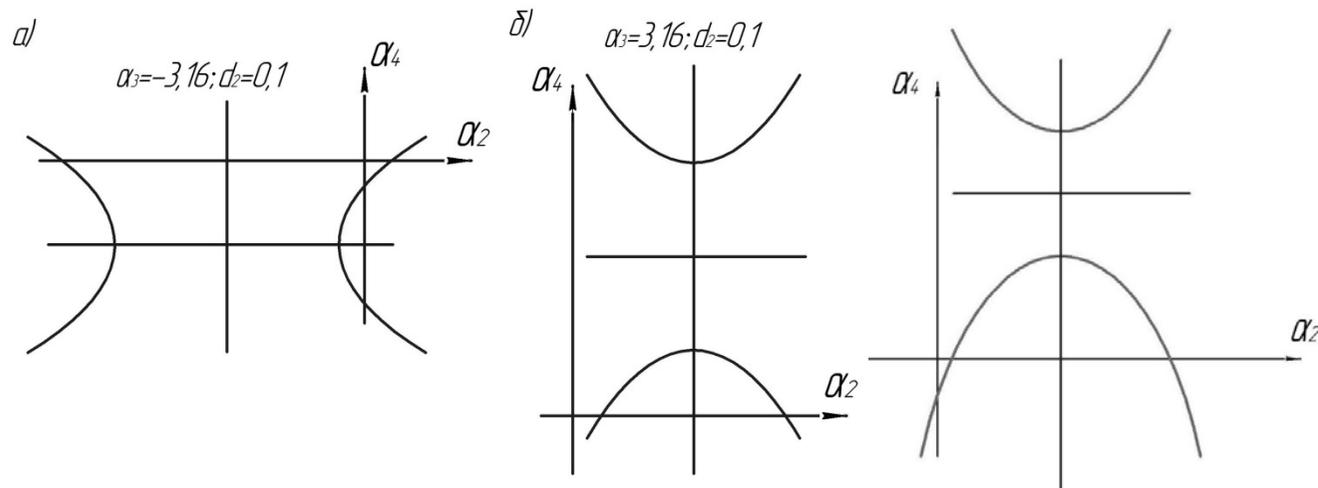


Рис. 10.3. График областей устранения сферической аберрации у двух тонких линз в воздухе:  
 а) первая линза отрицательная; б) первая линза положительная

Двум типам таких двухлинзовых половинок соответствуют точки, расположенные на двух ветвях гиперболы, получающейся при отрицательных передних линзах. Эти две половинки могут быть зашифрованы в виде

$$K(t, m) + B(t, m); \quad K(t, d) + B(t, d),$$

где буквой «м» обозначены тонкие линзы менискообразной формы и буквой «д» — линзы двояковогнутой и двояковыпуклой форм.

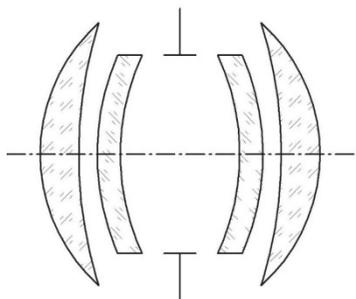


Рис.10.4. Объектив типа Гаусса

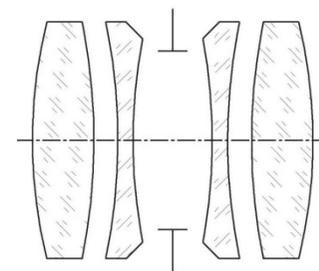


Рис.10.5. Объектив “Догмар” (“Целор”)

Двойные анастигматы, построенные на основе этих половинок, зашифруются следующим образом:

$$2[K(t, m) + B(t, m)];$$

$$2[K(t, d) + B(t, d)].$$

Анастигматы, построенные с использованием тонких линз менискообразной формы, известны под наименованием объективов типа Гаусса (рис. 10.4); они смыкаются с объективами типа  $2[B(анII) + K(кк)]$ .

Симметричные объективы, построенные на основе использования линз двояковыпуклой и двояковогнутой форм, известны под названием объективов «Догмар» (или «Целор»). Схема этих объективов представлена на рис. 10.5.

Половинки, составленные из первой положительной и второй отрицательной линз, можно зашифровать в виде  $B(t, m) + K(t, m)$ ; на их основе получают симметричные объективы, имеющие следующий шифр:

$$2[B(t, m) + K(t, m)];$$

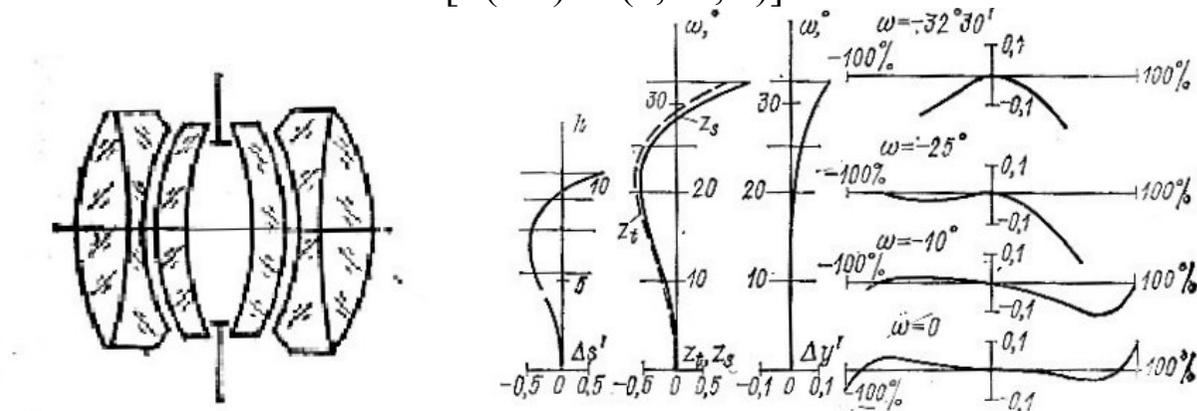
Они смыкаются с ОС типа  $B[k, -2K(та11), k]$  и при дальнейшей разработке приводят к объективам «Руссар-29».

### 10.3. Объективы типа «Плазмат», «Гелиос», Петцваля.

Объектив *типа плазмат* – симметричной конструкции с двумя коррекционными concentрическими линзами, которые расположены по обе стороны от базовых анастигматических менисков.

Шифр:

$$2[B(анI) + K(к, ас, к)]$$



10.6. Объектив «Ортометар» (типа плазмат)

Внутри концентрических менисков вводятся аномальные склейки (ас), которые обладают отрицательными высшими порядками анастигматизма, что увеличивает отрицательную меридиональную сферическую aberrацию. Необходимо использовать геометрическое виньетирование либо ограниченное поле зрения.

*Объектив типа «Планар».* Схема была предложена Рудольфом; наиболее распространена в фотографии. «Планар» – универсальный объектив повышенных возможностей, состоящий из 4-х компонентов (из них два внутренних склеенных), расположенных симметрично относительно плоской диафрагмы. Отечественным аналогом является объектив типа «Гелиос», применяемый главным образом в фотографических и киносъёмочных аппаратах, а также в качестве репродукционных объективов, в телевизионных системах и т.д.

Шифр объектива: Б(ка)+2К(анII, хс)+Б(ак).

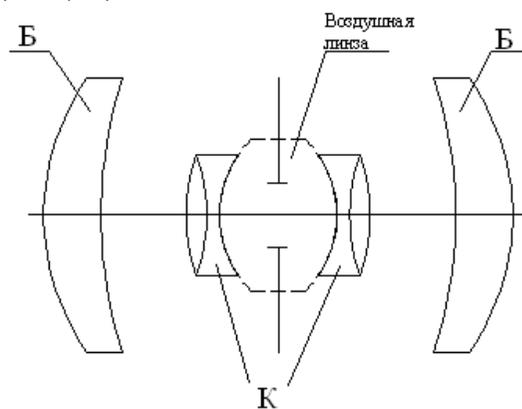


Рис.10.7. Объектив типа «Планар»

Хроматическая склейка служит для исправления хроматизма положения.

В исходных базовых линзах присутствует отрицательная сферическая aberrация. Для компенсации этих aberrаций вводится воздушная линза, которая отрицательной оптической силой (положительной сферической aberrацией), образованная вогнутыми поверхностями коррекционных элементов, расположенных вблизи диафрагмы.

*Объектив Петцваля* – 2х компонентная система, разделенная большим воздушным промежутком.

В нем невозможно исправить кривизну поля (изображения). Поэтому ставят только условие – исправление астигматизма (из полевых aberrаций) для получения анастигмата. Шифр: Б(т, нс)+Б(т, нс).

Расклеенный элемент обладает дополнительным коррекционным параметром – способствует устранению сферических aberrаций высших порядков. Такие схемы могут быть использованы в микроскопии в качестве схемы микрообъектива небольшого увеличения или они используются в конструкции микрообъективов с широкими апертурами в качестве коррекционных силовых элементов.

Объектив типа «Гелиос» представляет собой анастигмат, обеспечивающий высокое качество изображения в пределах всего поля зрения. Состоит из 4 или 5-ти компонентов (6 линз); апертурная диафрагма расположена между 3-ей и 4-ой линзами (рис. 10.8). Склейки служат для исправления хроматизма положения. К недостатку схемы можно отнести отрицательную сферическую aberrацию положительных линз. Ее устраняют, располагая анастигматические поверхности менисков вблизи материальной диафрагмы – образуется воздушная отрицательная линза, которая создает положительную сферическую aberrацию.

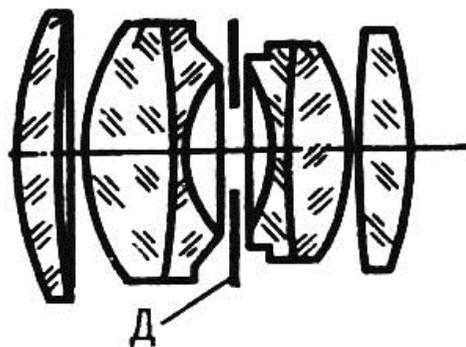


Рисунок 10.8. Схема объектива «Гелиос»

Параметры наиболее широко применяемых фотографических объективов «Гелиос» приведены в таблице 10.1.

Табл 10.1 – Основные технические характеристики некоторых объективов «Гелиос»

Название модели	Фокусное расстояние $f'$ , мм	Относительное отверстие	Угловое поле $2\omega$ , град.	Разрешающая способность, л/мм	
				в центре	на краю
«Гелиос-40»	85	1:1,5	28	32	16
«Гелиос-44»	58	1:2	40	35	14
«Гелиос-81»	52	1:2	45	40	25
«Гелиос-89»	30	1:1,9	52	46	22
«Гелиос-98»	28	1:2,8	56	50	35

## 11. ШИРОКОУГОЛЬНЫЕ ОБЪЕКТИВЫ

Создание широкоугольных систем наиболее сложная задача т.к. при увеличении поля зрения идет увеличение полевых aberrаций и уменьшение освещенности.

Освещенность внеосевой точки поля:  $E'_w = E'_o K_w \cos^4 w$ ; функция светораспределения  $\Phi = \frac{E_w}{E_0} = K_w \cdot \cos^4 \omega$ .

Из-за резкого спада освещенности по полю невозможно вводить геометрическое виньетирование, которое используется для уменьшения кружка рассеяния в широких внеосевых пучках.

Основная задача расчетчика – корригировать все aberrации широкого наклонного пучка:

– устранение нечетных aberrаций (кома, дисторсия, хроматизм увеличения) решается за счет симметричных или пропорциональных конструкций;

– четные aberrации (кривизна поля, астигматизм, меридиональная и сагиттальная сферическая aberrация широкого пучка) исправляют различными приемами.

К примеру, борьба с астигматизмом и кривизной поля решается использованием аномальных склеек.

Наибольшую трудность представляет полевая асферическая aberrация (одна из трех составляющих поперечной aberrации широкого внеосевого пучка; две другие – астигматизм и кома).

Меридиональную сферическую aberrацию широкого внеосевого пучка исправляют введением базовых элементов, концентрических линз.

### 11.1. Широкоугольный объектив “Лиар”

Шифр объектива: К(О,К)+2Б(К,К)+К(Т,АН).

Отрицательная линза (первая) развивает поле зрения. Вторая линза (концентрическая) нужна для компенсации. Плоские поверхности не вносят ни комы, ни астигматизма, ни кривизны поля, но возможно возникновение отрицательной дисторсии.

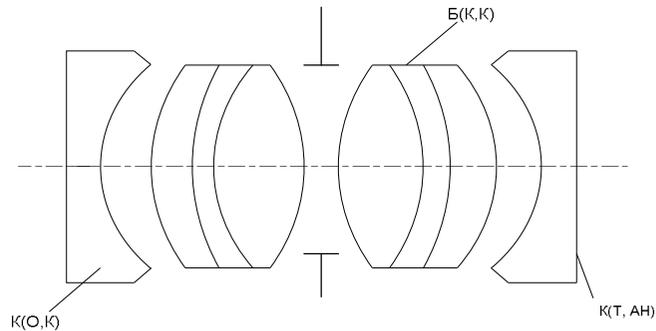


Рис. 11.1. Широкоугольный объектив Лиар

## 11.2. Широкоугольный зеркально-линзовый объектив

Одной из особенностей работы зеркальных поверхностей с асферикой второго порядка является возможность устранения астигматизма для расположения выходного зрачка в одном из геометрических фокусов кривой второго порядка. При отражении сохраняется равенство углов падения и отражения, т.е. точки отражения главного луча рассматривают как узловые точки. Теми же свойствами обладают концентрические поверхности. Отметим, что концентрические линзы и отражательные поверхности будут строго свободны от хроматизма увеличения.

При развертке зеркальных вогнутых поверхностей их рассматривают в качестве положительных зеркальных линз, отличающихся тем, что создаваемая кривизна поверхности изображения при положительной силе является положительной, поэтому сочетая зеркальную линзу с концентрической системой, обладающей при положительной силе отрицательной кривизной, получим потенциальную возможность устранения кривизны поля для заданного полевого угла.

В широкоугольных зеркально-линзовых объективах применяются

- отражательные поверхности 2-го порядка (они являются анастигматичными, когда зрачки совмещаются с геометрическими фокусами кривых);
- концентрические поверхности (свободны от астигматизма, когда главный луч проходит через общий центр кривизны этих поверхностей).

Базовая схема сочетает эллиптическое зеркало и концентрическую линзу. Возможно введение плоского зеркала с отверстием, совпадающим с входным зрачком. Ее можно применять в качестве исходной и строить симметричную конструкцию с устранением нечетных абераций. Эллиптическая поверхность не будет корригирована на кому и дисторсию.

Угловое поле базового объектива  $2\omega = 120^\circ$ .

### 11.3. Объектив Руссар

Построен по принципу объектива Гаусса. Шифр объектива: 2[Б (АН|| +К(К,К)).

Угловое поле объектива  $2\omega = 100^\circ$ .

Дальнейшее развитие этой схемы привело к созданию новых объективов: Б[К – 2К(Т а П)К]. Кроме того внутри базовых линз можно вводить аномальные склейки, которые исправляют астигматизм.

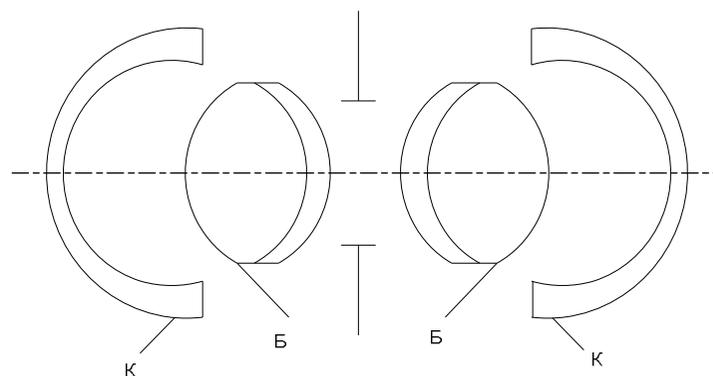


Рис. 11.2 . Широкоугольный объектив Руссар.

Развитие схем этих объективов привело к принципиально новым объективам, которые обладают положительным виньетированием (абберационным), что улучшает функцию светораспределения:  $\Phi \approx \cos^3 \omega$ .

Создана большая серия объективов типа «Руссар».

Дальнейшее усовершенствование данных объективов велось по нескольким направлениям:

- 1) за счет усложнения компоновки;
- 2) за счет разделения коррекционных отрицательных менисков;

такое разделение аналогично введению в первоначально коррекционную линзу двух пар воздушных телеконцентрических линз, шифр Б[К – 2К(Т а П)К];

- 3) могут быть использованы 3-е компоновки.

Уменьшение aberrаций способствует повышению относительного отверстия и улучшению качества изображения. Уменьшение aberrаций способствует повышению относительного отверстия и улучшению качества изображения.

Вторые и третьи компоновки вносят дополнительное виньетирование при  $2\omega = 120^\circ$ :

## 12. МИКРООБЪЕКТИВЫ

### 12.1. Особенности и методы расчета микрообъективов

Объектив является наиболее ответственным узлом микроскопа, так как от его числовой апертуры и коррекции aberrаций зависят разрешающая способность и качество изображения в целом.

Основные трудности расчета:

1. исправление aberrаций осевого пучка (сферическая и хроматизм положения)
2. обеспечение большой апертуры  $A$  в пространстве предметов для получения большого разрешения;
3. исправление полевых aberrаций (кривизна поля, астигматизм и кома).

Если микрообъектив невысокого качества, то используются компенсационные окуляры, которые компенсируют:

- хроматизм увеличения;
- апертуру.

Методы расчета объективов микроскопа:

- метод проб: выбирается аналог с возможно близкими оптическими характеристиками к рассчитываемому объективу, изучается влияние изменения конструктивных элементов на aberrации и оптические характеристики и путем интерполяции или экстраполяции находят новые значения конструктивных элементов и производят контрольные расчеты хода лучей, в результате которого выясняется действительное состояние коррекции (повторяется

несколько раз до получения удовлетворительного решения); метод достаточно эффективен, когда исходный объектив близок к рассчитываемой ОС.

- алгебраический метод используется при расчете объективов небольшой числовой апертуры и увеличения: оптическая схема обычно состоит из двух компонентов; эффективна методика для ОС из тонких компонентов в области aberrаций 3-го порядка.

- комбинированный – рациональное сочетание алгебраического и метода проб (алгебраический используют в начале для коррекции aberrаций 3-го порядка, метод проб – для коррекции остаточных aberrаций высшего порядка).

- метод расчета по частям: – микрообъектив условно разделяют на две части, рассчитываемые в начале расчета отдельно при соблюдении заданных оптических характеристик (увеличение, фокусное расстояние, числовая апертура, поле, длина тубуса, рабочее расстояние) при соединении частей, а также при обеспечении необходимой для данного типа коррекции aberrаций.

При расчете *первой фронтальной части*, работающей со значительной числовой апертурой, могут использоваться апланатические поверхности. Например, фронтальные апланатические мениски.

Апертура уменьшается в  $n^2$  раз, что облегчает работу последующей системы. Т.к. апертурный угол для *второй части* существенно снижается, возможно использовать алгебраический метод (коррекция aberrаций 3-го порядка), который позволяет определить необходимое число компонентов в оптической схеме и выбрать их тип. Но линза остается не ахроматизированной. Оптимизация схем производится на ЭВМ.

## 12.2. Анализ композиций оптических систем микрообъективов

*Фронтальная часть - плоскоапланатическая линза.* При всех своих положительных свойствах эта линза считается неахроматизированной. Ее хроматизм положения и увеличения:

$$\delta s' = -\frac{n^2 - 1}{v} \cdot r, \quad \frac{dy'}{y'} = \frac{n^2 - 1}{n^2 \cdot v}. \quad (12.1)$$

С ростом увеличения микрообъектива значения хроматизма весьма ощутимы, т.е. во второй части после плоскопланатической линзы, кроме исправления собственных aberrаций, необходимо исправлять хроматизм положения и увеличения, а также кривизны поля фронтальной линзы.

Для второй части микрообъектива используют обычно систему из двух компонентов, разделенных значительным воздушным промежутком, при этом будет облегчена коррекция сферической aberrации и хроматизма положения. В результате имеем композицию микрообъектива: ахромат со средними значениями увеличения и апертуры. Схема микрообъектива с увеличением  $\beta=40\times$  и апертурой 0,65 и графики aberrаций изображены на рис. 12.1.

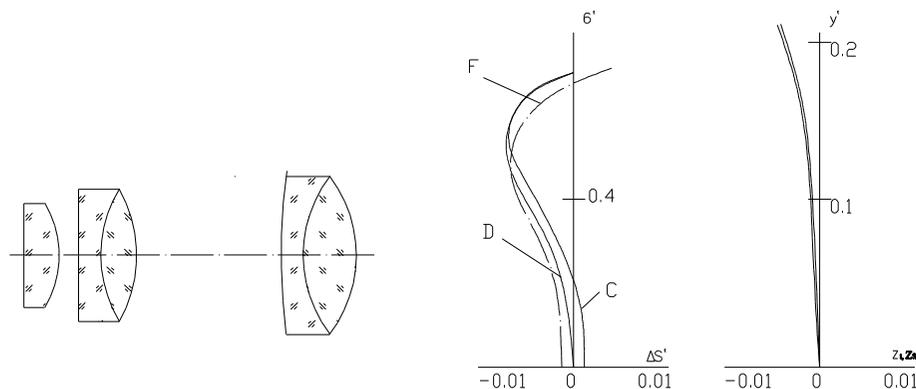


Рис.12.1 – Микрообъектив ахромат  $40\times 0,65$

При ахроматизации объектива для двух линий спектра остается довольно большой остаточный хроматизм – вторичный спектр. Поэтому при создании *светосильных* микрообъективов с большими апертурами и увеличениями необходимо вводить в их принципиальную схему дополнительные конструктивные элементы, позволяющие расширить коррекционные возможности базовой системы.

*Фронтальный компонент с плоской и конфокальной поверхностями.* Подобная линза имеет увеличение  $\beta= n$ . В такой фронтальной линзе полностью устранены сферическая aberrация, кома и хроматизм положения. Вторая конфокальная поверхность линзы вносит положительный астигматизм. Таким образом, все эти особенности способствуют уменьшению нагрузки для 2-й части ОС в отношении исправления aberrаций.

Отсутствие хроматизма положения в плоскоконфокальных линзах позволяет использовать марки стекол с высокими показателями преломления (типа СТК), что обеспечивает достаточное линейное увеличение в сравнении с плоскоапланатическими линзами.

При образовании воздушного предметного отрезка (также как и с плоскоапланатической фронтальной линзой) появляется отрицательная сферическая aberrация, но она может быть скомпенсирована за счет некоторого отступления 2-й поверхности от конфокальности, при котором возникает положительная сферическая aberrация. При этом одновременно происходит некоторое повышение линейного увеличения.

Перечисленные факторы позволяют создать микробъектив, состоящий всего лишь из плоскоконфокальной фронтальной линзы и двухлинзового склеенного компонента.

Микробъектив 40x0,4 с конфокальной фронтальной линзой представлен на рис. 12.2.

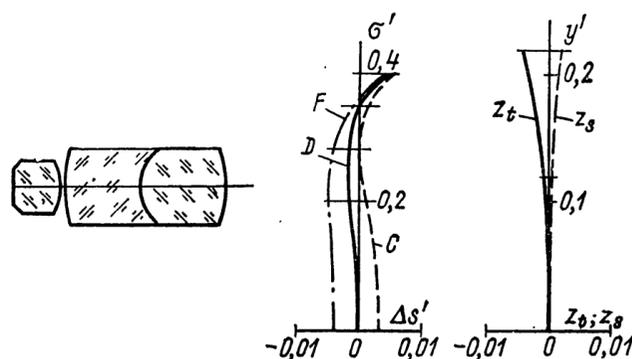


Рис.12.2. Микробъектив с фронтальной конфокальной линзой 40x0,4

Применение конфокальной поверхности во фронтальной линзе с высоким показателем преломления дает возможность отказаться от применения во 2-й части микробъектива двухлинзовых склеенных компонентов, разделенных конечным воздушным промежутком. Получаем телеконфокальную фронтальную линзу: из двух конфокальных поверхностей образована телескопическая система, которая *практически безабберационна* (исключена сферическая aberrация, кома, астигматизм, кривизна поля и хроматизм положения, а также при соответствующем подборе чисел Аббе – хроматизм увеличения). Она обладает линейным увеличением, равным показателю прелом-

ления ее положительной линзы. На рис. 12.3 приведена схема микрообъектива планохромата ( $f^2=3,96$  мм; апертура 0,1), построенного из плосковыпуклой и телеконфокальной линз.

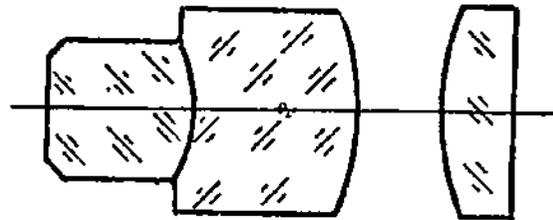


Рис.12.3. Микрообъектив планохромат с телеконфокальной линзой

### 12.3. Зеркально-линзовые микрообъективы

При использовании отражающих поверхностей в микрообъективах, как и в других ОС, можно кардинально устранить хроматизм и получать изображения в широком спектральном диапазоне.

Часто используют двухзеркальные концентрические системы (схема Боуэна).

В целях обеспечения необходимой жесткости конструкцию подобной двухзеркальной концентрической системы можно выполнить в виде монолитного элемента из массы стекла; при этом входная и выходная поверхности должны быть конфокальными по отношению к предметной точке и к точке изображения. Подобная система (на основе зеркала Манжена) была предложена Максутовым и представлена на рис. 12.5, а. Данный тип объективов часто используется в УФ (характеристики  $A=0,85$ ,  $\lambda=0,276$  мкм). Коэффициент центрального экранирования  $\eta=0,39$ .

Однако схема микрообъектива Максутова, несмотря на устойчивость, оказывается нетехнологичной, существуют трудности центрировки (необходимо на одной и той же детали сцентрировать четыре сферические поверхности, сохраняя одновременно и весьма жесткий допуск на толщины).

Пара концентрических зеркал использовалась в качестве базовой системы также в схемах:

- зеркально-линзового микрообъектива Волосова (рис. 12.5, б); объектива Попова (рис. 12.5, в).

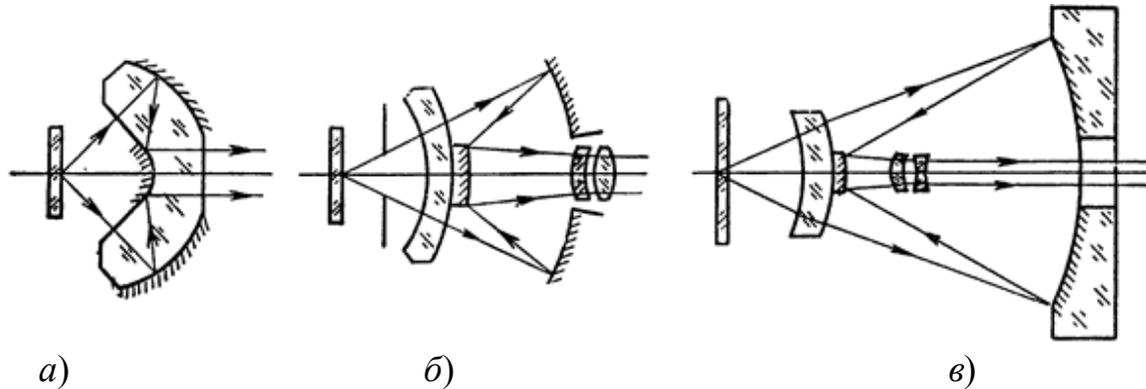


Рис. 12.5. Схемы зеркально-линзовых объективов: *a* - объектив Максудова 60х 0,85; *б* - объектив Волосова 40 х0,50; *в* - объектив Попова ( $f' = 6,1\text{мм}$ ;  $A = 0,65$ )

В обеих схемах после пары зеркал размещается коррекционный элемент-компенсатор. К недостатку следует отнести разделение зеркал воздушным промежутком, что создает опасность разъюстировки микрообъективов.

Самая простая схема зеркально-линзового микрообъектива состоит из плосковыпуклой линзы, обращенной выпуклой стороной к предмету и плоской к изображению (рис. 12.6). В схеме нет никаких коррекционных элементов, а апертура и поле зрения определяются aberrациями сферической зеркальной поверхности.

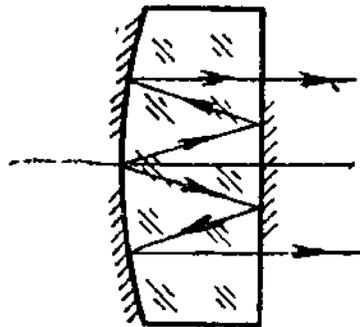


Рис. 12.6. Однолинзовый микрообъектив ( $f' = 3,1\text{ мм}$ ;  $A = 0,5$ )

## 13. ЗЕРКАЛЬНЫЕ И ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫЕ ОБЪЕКТИВЫ

### 13.1. Назначение и схемы построения зеркально-линзовых объективов

Достоинства: работают в широком спектральном диапазоне; практическое исправление хроматизма.

Недостатки: центральное экранирование.

Зеркально-линзовые объективы относятся к длиннофокусным ОС. Схема построения – телеобъектив с вынесенной главной плоскостью, т.е. имеют наименьшие габаритные размеры. Одна из основных областей применения – астрономия; предназначены для фотографирования удаленных предметов крупным планом.

Объектив состоит из трех основных частей:

зеркальной базовой системы и

афокальных менисков, сохраняющих параллельность выходящего луча входящему и удобных для устранения сферической аберрации;

компенсатора, корригирующего кому и кривизну поверхности изображения.

Для устранения засветки плоскости изображения паразитными лучами внутри объектива устанавливается специальная коническая диафрагма – бленда. Бленда имеет матово-черную рифленую поверхность.

*Базовые системы* – одно или два зеркала. Возможность двухзеркальных систем, даже с 2-мя несферическими поверхностями, ограничены: с их помощью можно исправить только две монохроматические аберрации: сферическую и кому.

Астигматизм и дисторсия не могут быть полностью исправлены; если осевая длина  $d = 0,1-0,2 f'$  (короткие ОС), кривизна изображения очень велика. Базовые ОС усовершенствуют с помощью компенсаторов.

Типы линзовых компенсаторов:

афокальные ахроматические компенсаторы (например, коррекционная пластинка Шмидта);

мениск Д.Д. Максудова

двухлинзовые компенсаторы, установленные в параллельных или сходящихся пучках;

компенсатор меридиональной комы В.Н. Чуриловского;

линзовые компоненты с отражающей поверхностью (линза Манжена, склеенный и несклеенный компоненты-отражатели);

компенсатор кривизны поля – линза Смита.

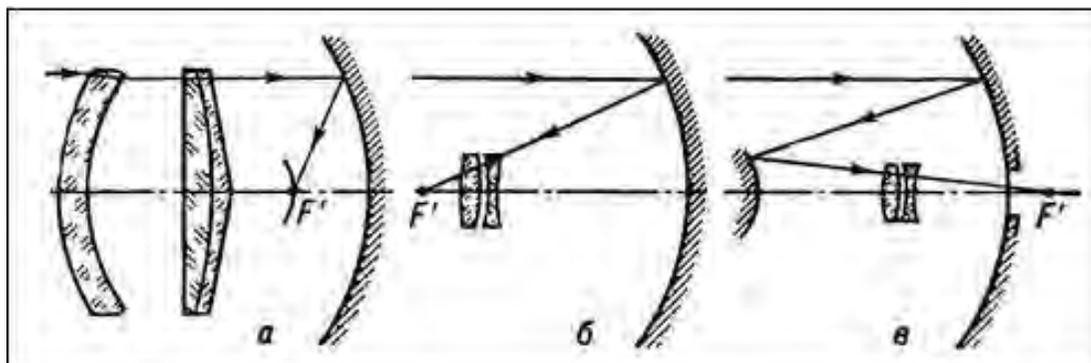


Рис. 13.1. Астрономические зеркально-линзовые системы с линзовыми компенсаторами aberrаций: а — объектив со сложным афокальным компенсатором; б — телескоп с компенсатором У. Росса; в — система Г. Г. Слюсарева с параболическим большим зеркалом и сферическим малым.

Сверхсветосильный объектив с большим углом зрения (до  $30^\circ$ ) (рис. 13.1, а) применяется для фотосъёмки движущихся небесных тел, исправлены все aberrации кроме кривизны поля. В телескопе с параболическим базовым зеркалом (рис. 13.1, б) применен компенсатор комы. В системе (рис. 13.1, в) исправлены все aberrации, кроме дисторсии; уменьшена длина системы  $L$  (значительно меньше её  $f'$ ). В уникальных астрономических приборах применяют ахроматические мениски, что расширяет ширину спектральной области, для которой система первоклассна. При переходе от визуальной коррекции к фотографической приходится несколько изменить конструктивные элементы менисковой системы. Но если линзовый объектив может удовлетворительно работать лишь в тех условиях, для которых он корригирован, менисковый объектив в большинстве случаев может быть применен одновременно и для визуальных, и для фотографических исследований, т.к. его вторичный спектр и сферохроматическая aberrация ничтожно малы.

## 13.2. Менисковые системы

**Менисковые системы** – первые отечественные зеркально-линзовые объективы, созданные Максутковым, в которых, в отличие от систем Шмидта, все оптические поверхности строго сферические, а длина  $L$  не превышает фокусное расстояние системы.

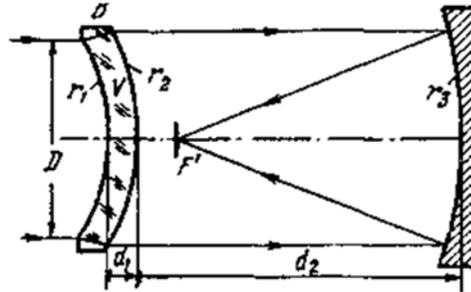


Рис. 13.2. Оптическая схема простейшего менискового телескопа

Простейшая оптическая схема менискового телескопа (рис. 13. 2) в принципе может содержать лишь два оптических элемента: мениск и сферическое зеркало. Такую ОС называют классической менисковой системой.

Рассмотрим системы, разработанные на основе мениска Максудова.

«*Менисковый Ньютон*» получается из системы «мениск—вогнутое зеркало» путем добавления к ней диагонального зеркала  $C$ , которое можно прикрепить к мениску  $B$ . Схема лишена смысла при высокой светосиле системы (большие размеры зеркала  $C$ , потери на экранирование и снижение качества дифракционного изображения). Рационально относительное отверстие 1:2.5. Менисковый Ньютон отличается от классического применением сферических зеркал и исправлением комы (увеличение поля).

«*Менисковый Гершель*». ОС из внеосевых частей схемы «мениск-вогнутое зеркало». Обладает свойствами полной ОС (ахроматична и апланатична). Изображение наблюдают непосредственно на оси в фокусе  $F$ , либо смещают с помощью диагонального зеркала, которое не экранирует действующих пучков.

Преимущества перед классической системой Гершеля огромны:

- закрытая конструкция;
- зеркало и мениск имеют технологичные для изготовления и контроля сферические формы поверхностей (в классической схеме децентрированный параболоид, сложный в изготовлении);
- имеет увеличенное поле, так как ОС апланатична и скорретирован астигматизм.

«*Менисковый Мерсенн*» может быть осуществлен в двух вариантах, в соответствии с двумя классическими схемами Мерсенна.

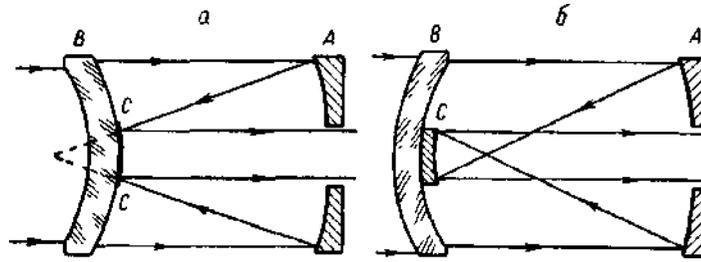


Рис. 13.3. Менисковый Мерсенн

Вторичное зеркало можно выполнять двояко: либо нанося зеркало на центральную часть  $C$  мениска  $B$ , либо наклеивая (ставя на контакт или закрепляя оправой) к мениску  $B$  зеркало  $C$ .

«Менисковый Кассегрен» представляет собой одну из наиболее интересных для астронома систем (рис. 13.4). Мениск  $B$  и сферическое зеркало  $A$  имеют остаточную сферическую aberrацию (недоисправленная ОС с фокусом  $F$ ). Вторичное зеркало  $C$  переносит изображение в  $F_1$  и доисправляет aberrацию всей системы.

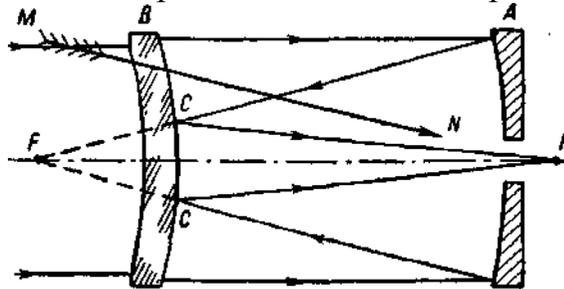


Рис. 13.4. Менисковый Кассегрен

Построена по схеме телеобъектива (малая длина при значительном фокусном расстоянии); является предфокальной системой. ОС наиболее предпочтительна из существующих аналогов.

### 13.3. Устранение паразитного света блендами в схеме «Менискового Кассегрена»

При визуальных наблюдениях или при фотографировании в фокусе  $F_1$  поле засвечивается паразитным светом, идущим, например, в направлении стрелки  $MN$  (рис. 13.4); в результате наблюдаемое изображение может потерять в контрасте, а фотопластинка вуалироваться.

Существует четыре способа борьбы с паразитным светом (рис. 13.5):

1) В плоскости кружка  $mn$  помещаем действительную диафрагму, отсекающую паразитные лучи (рис. 13.5, а). Этот способ пригоден для визуальных приборов. Его достоинство – конструктивная простота; недостаток – невозможность расположить зрачок глаза в плоскости окулярного кружка, которая занята диафрагмой, что дает снижение видимого поля зрения, и неприятное ощущение от соприкосновения ресниц с диафрагмой.

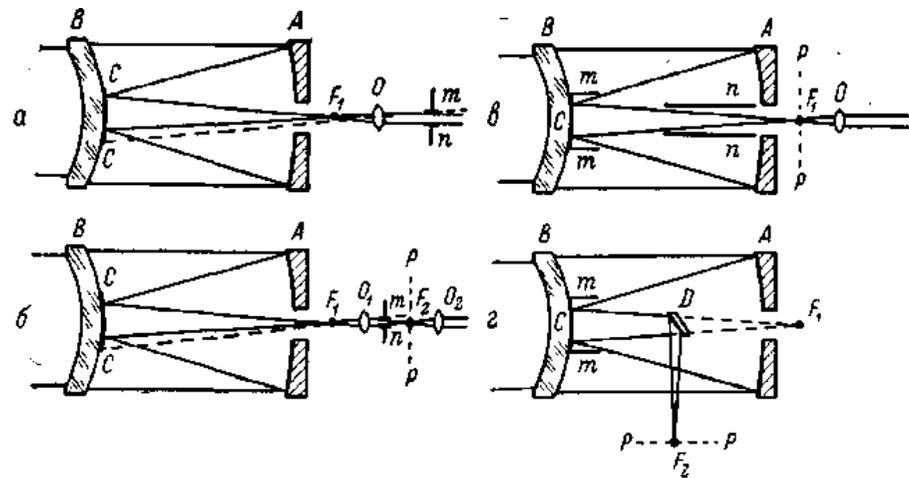


Рис. 13.6. Установка бленд

2) Последний недостаток устранен введением дополнительной оборачивающей системы  $O_2$ , переносящей изображение из  $F_1$  в  $F_2$  (рис. 13.5, б), тогда диафрагма  $mn$  не мешает глазу, расположенному за окуляром  $O_2$ , системы  $O_1$  и  $O_2$  образуют вместе земной окуляр. Недостатки: а) сложность конструкции и дополнительные потери света из-за введения системы  $O_2$ , б) трудность расчета оборачивающей системы  $O_2$ ,

которая не должна вносить значительных aberrаций для наклонных пучков, чтобы не ограничивать размеры полезного фотографического поля.

3) Прочертив ход лучей внутри трубы, можно определить наличие «мертвого пространства», где нет действующих лучей. В нем можно расположить две трубки - бленды  $mt$  и  $nn$ , преграждающие дорогу паразитным лучам. Для малых полей ограничиваются только одной трубкой  $nn$  (рис. 13.5, в).

Достоинство: сравнительная простота конструкции, недостатки: размеры зеркала  $C$  приходится увеличивать, что повышает экранирование, бленда  $nn$ , даже хорошо зачерненная, дает некоторую засветку полю (на нее падают скользящие лучи); для ее устранения в  $nn$  устанавливают дополнительную диафрагму у переднего среза, что тоже повышает экранирование.

4) Последний недостаток устраняют введением диагонального зеркала  $D$  в месте переднего среза трубки  $mt$  и выполняющего роль трубка  $nn$ , схема выгоднее в смысле виньетирования и засветки поля (рис. 13.5, г). Зеркало  $D$  вводится в отверстие в зеркале  $A$ ; оно переносит фокус из  $F_1$  в  $F_2$ , позволяя наблюдать светила, близкие к зениту. При этом трубка  $mt$  может быть лишней.

#### 13.4. Зеркально-линзовая система с мениском Максудова

В целях устранения сферической aberrации сферического зеркала используют мениск Максудова, роль которого сводится к созданию положительной сферической aberrации без внесения хроматизма.

При расположении центров обеих поверхностей мениска Максудова вблизи центра зеркала обеспечивается неизменность астigmatизма и комы. Возможны два положения мениска, более предпочтительно, когда мениск находится между центром и вершиной зеркала (тогда длина объектива будет значительно короче фокусного расстояния зеркала).

Исправление сферической aberrации в системе из зеркала с мениском Максудова будет осуществимо лишь для одной высоты апертурного луча, этим ограничивается возможное развитие относительного отверстия.

Рассмотрим условие ахроматизации для мениска:  $d\Phi = 0$  (рис. 13.6).

$$\text{Оптическая сила толстой линзы } \Phi = (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{d}{nr_1 r_2} (n-1)^2.$$

Продифференцируем это выражение и приравняем дифференциал нулю ( $d\Phi = 0$ ); получаем уравнение, связывающее радиусы и толщину мениска

$$r_2 - r_1 + d(1 - 1/n^2) = 0 \quad (13.1)$$

Из формулы (13.1) может быть определена толщина мениска:

$$d = (r_1 - r_2) / (1 - 1/n^2) \quad (13.2)$$

Подставляя эту формулу в уравнение силы толстой линзы, получаем выражение

$$\Phi_M = \frac{n-1}{n+1} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (13.3)$$

*Пример расчета:* система вида К(М)+БЗ(к). Особенностью расчета этого зеркально-линзового объектива является то, что мениск не принимается бесконечно тонким ( $d_1 \neq 0$ ,  $h_1 \neq h_2$ ) (рис. 13.6).

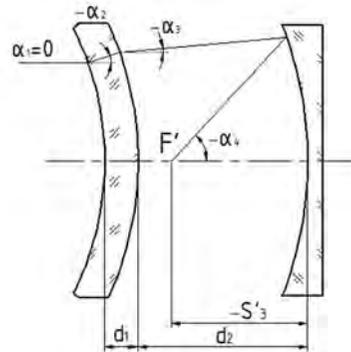


Рис. 13.6. Ход нулевого луча в менисковой системе

Составим систему уравнений (1-е: условие ахроматизации мениска; 2-е: условие компенсации мениском сферической aberrации зеркала). Уравнения запишем при нормировке  $\alpha_1 = 0$ ,  $\alpha_4 = -1$ ,  $h_1 = -f_{об}^2$ .

Находят угол  $\alpha_2$ :

$$\alpha_3 = d_1 \alpha_2^2 (1 - d_1 \alpha_2) \quad (13.4)$$

$$h_1 P_1 + h_2 P_2 = -h_3 P_3,$$

где основные параметры

$$\begin{aligned}
 P_1 &= a\alpha_2^3; \\
 P_2 &= a(\alpha_3 - \alpha_2)^2(n\alpha_3 - \alpha_2); \\
 P_3 &= 0.25(1 + \alpha_3)^2(1 - \alpha_3); \\
 a &= \frac{n}{(1 - n)^2}.
 \end{aligned}
 \tag{13.5}$$

Тогда имеем уравнение

$$d_1^2\alpha_2^5 - d_1(n+1)\alpha_2^4 + (d_1^2S_{I3ze} / a)\alpha_2^2 - (2d_1S_{II3z} / a)d_2 + S_{I3ze} / a = 0
 \tag{13.6}$$

(первоначально значение  $S_{I3ep}$  вычисляют в предположении, что  $\alpha_3=0$ ). Из уравнения (13.4) определяют действительное значение угла  $\alpha_2$ , по формуле (13.5) вычисляют угол  $\alpha_3$  и заново определяют  $S_{I3ep}=h_3P_3$ . Из уравнения (13.6) вновь находят угол  $\alpha_2$ . Оставляют вариант, когда расстояние  $d_2=(1,2\dots 1,5)f_{об}$

При положительных значениях обоих радиусов положительная толщина получается тогда, когда первый радиус будет больше второго, что дает отрицательное значение силы всего мениска. Система полностью ахроматическая. Мениск обладает положительной сферической абберацией.

Недостаток: трудно развить большое относительное отверстие.

### 13.5. Система Шмидта

Рассмотрим ОС с простейшим афокальным компенсатором – систему Шмидта. Базовым элементом является сферическое зеркало, с центром которого совмещен входной зрачок. При таком расположении зрачка зеркало уподобляется концентрической линзе, благодаря чему обеспечивается строгое устранение астигматизма и комы для произвольно большого поля зрения. Однако сферическая абберация зеркала остается неисправленной.

Для компенсации сферической абберации зеркала Шмидт предложил разместить в плоскости входного зрачка афокальную коррекционную пластинку, одна из поверхностей которой (обычно вторая) деформирована, с радиусом кривизны в вершине, равным бесконечности. Вследствие этого при устранении сферической абберации не возникают астигматизм и кома. Схема системы Шмидта имеет шифр: К (асф) + БЗ (к).

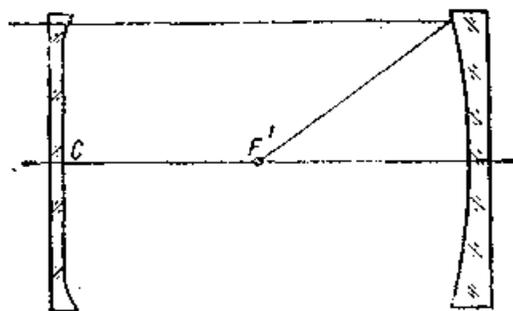


Рис.13.7. Зеркально-линзовая система Шмидта

Для работы системы Шмидта характерна *следующая особенность*.

Ширина наклонного пучка в меридиональном сечении, перпендикулярная главному лучу, уменьшается по отношению к ширине осевого пучка пропорционально  $\cos\omega$ . Поэтому невозможна точная компенсация сферической аберрации зеркала по полю при ее коррекции на оси, т.е. у зеркала с ростом полевого угла сферическая аберрация сохраняется постоянной. В наклонном пучке возникает некоторая кома из-за того, что крайние лучи наклонного пучка преломляются на деформированной поверхности с различными углами падения  $\varepsilon$ . Для параксиальных лучей коррекционная пластинка является афокальной системой, поэтому хроматизм не возникает.

Рассмотрим конструктивные параметры пластины.

*Асферическая пластинка Шмидта:* а)  $R = \infty$  ; б)  $R \neq \infty$

Асферизация пластины – высших порядков (именно для больших полей зрения  $2\omega$ ). Пластинка афокальная, поэтому параметры главного зеркала не нарушаются.

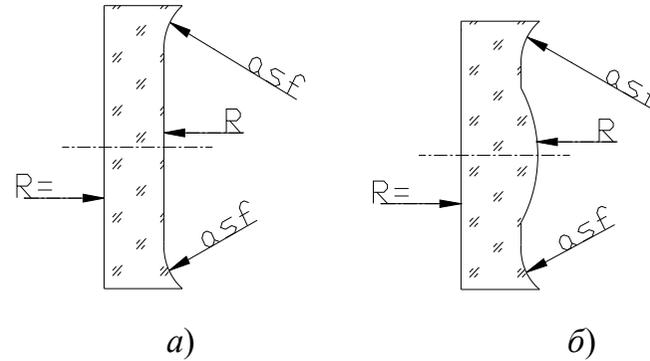


Рис. 13.8. Пластина Шмидта

Сферическая aberrация сферического зеркала:  $\Delta S' = -\frac{h^2}{8 \cdot f'}$ , где  $h$  – половина входного зрачка.

Волновая aberrация сферического зеркала равна  $\Delta l = \frac{h^4}{32 \cdot (f')^3}$ ; из условия компенсации имеем:

$$\Delta l = \frac{(n-1) \cdot \Delta d}{n} = \frac{h^4}{32 \cdot (f')^3} = \frac{(n-1)}{n} \cdot z,$$

Тогда находим профиль асферики:

$$z = \frac{n \cdot h^4}{32 \cdot (n-1) \cdot (f')^3} \quad (13.7)$$

Меридиональная волновая aberrация будет равна разности величин волновой aberrации пластины и волновой aberrации зеркала. Она неоткорректирована, и есть остаточная кома. Сферохроматическая aberrация может быть устранена, если в центре пластинки ввести некоторый радиус кривизны (рис. 13.8, б). Появлением  $R$  мы вводим дополнительную оптическую силу, поэтому устраняются хроматизм положения и сферохроматическая aberrация. Существующая кривизна поля может быть откорректирована размещением близфокальной линзы (например, линзы Смита).

### 13.6. Зеркально-линзовый объектив типа МТО

Зеркально-линзовые объективы имеют большой коэффициент виньетирования, поэтому их угловое поле не-  
большое (МТО-500:  $2\omega = 4^\circ 30'$ ; МТО-1000:  $2\omega = 2^\circ 30'$ ).

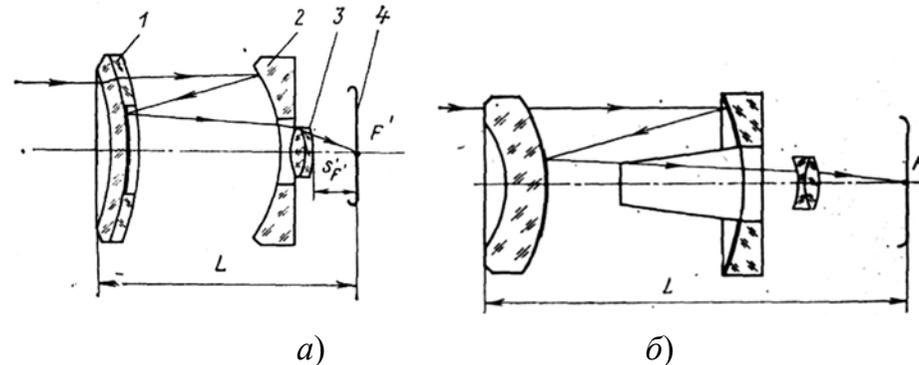


Рис.13.9. Принципиальная схема зеркально-линзовых фотообъективов

Фокусировка зеркально-линзовых объективов осуществляется перемещением афокального мениска 1 (с выполненным на нем зеркалом) относительно неподвижного зеркала 2 (базовой ОС) и склеенной линзы 3 (группы линз) – компенсатора. Такой способ фокусировки позволяет переходить при съемке от бесконечности к коротким дистанциям при весьма малых перемещениях мениска: это преимущество.

Так как объективы имеют большое фокусное расстояние, они чувствительны к тряске и вибрациям, для фотографирования нужен штатив. Недостатками объективов являются сложность конструкции, трудности в изготовлении и сборке (жесткие допуски на центровку и пр.), большой коэффициент светорассеяния. Кроме того, по сравнению с линзовыми объективами при одном и том же относительном отверстии, они имеют большие диаметры. При переходе от визуальной коррекции к фотографической приходится несколько изменить конструктивные элементы менисковой системы. Но если линзовый объектив может удовлетворительно работать лишь в тех условиях, для которых он скорректирован, менисковый объектив в большинстве случаев может быть применен одновременно для визуальных, и фотографических исследований потому, что его вторичный спектр и сферохроматическая абберация ничтожно малы.

### 13.7. Системы В.Н. Чуриловского

Используется *афокальный апохроматический корректор* в двух схемах кассегреневского типа (рис.13.10) с одним и двумя корректорами из двух линз, выполненных из стекла одной марки, причем все поверхности системы, включая зеркала, имеют сферическую форму.

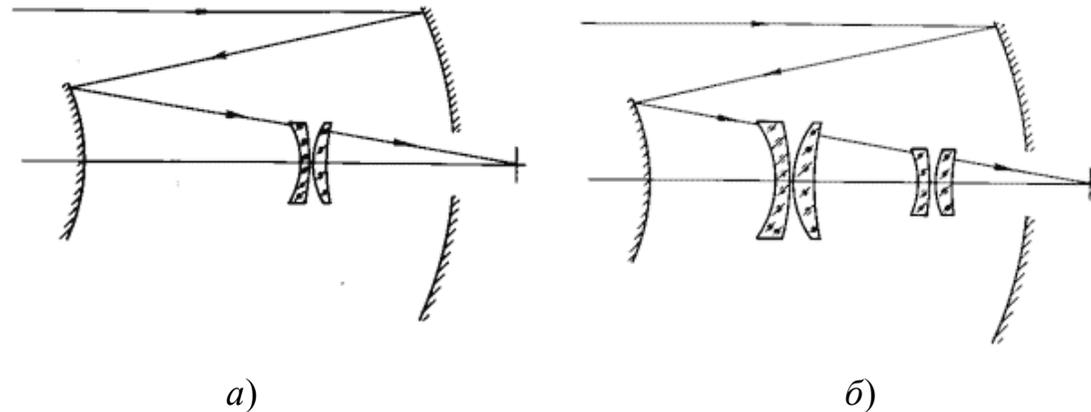


Рис. 13.10. Системы Чуриловского: а) с одним корректором; б) с двумя корректорами

Известны исследования П.П. Аргунова по этой системе:

несмотря на высокое качество коррекции вторичного спектра, в системе рис.13.10, а большой астигматизм, что связано с необходимостью значительно отодвигать корректор от вторичного зеркала, чтобы пропустить крайние лучи; по этой же причине исправление сферохроматической aberrации также неудовлетворительно. Система (рис.13.10, б) чрезвычайно сложна в изготовлении и юстировке.

*Методика расчета.*

Если исходить из соображений формального характера, например, из числа свободных параметров, действующих на aberrации, то система с компенсатором внутри может показаться более выгодной, чем система с компенсатором в параллельном пучке, т.к. в первом случае появляется лишний параметр – положение афокального компонента. Однако это преимущество пропадает вследствие того, что положение афокального компонента фактически определяется однозначно. Если расположить его близко ко 2-му зеркалу, то лучи, выходящие из большого зеркала, дважды проходят через компенсатор и тогда количество его aberrационных параметров уменьшается с двух

до одного ( $W$  близко или равно 0). Если поместить его близко к фокальной плоскости, он практически влияет только на дисторсию. Поэтому рационально ставить его посередине между 2-ым зеркалом и фокальной плоскостью, что приводит к максимально возможной величине  $h$ , а, следовательно, к максимально возможному значению  $hP$ , действующему на сферическую aberrацию и кому.

Рассмотрим систему, состоящую из 2-ух сферических зеркал и компенсатора (посередине между 2-ым зеркалом и фокальной плоскостью).

$$\text{Высоты } h_3 \text{ и } y_3 \text{ на компенсаторе равны: } h_3 = \frac{h_2}{2} \text{ и } y_3 = -\frac{1}{2}$$

Условимся давать параметрам  $P_3$  и  $W_3$  такие значения, чтобы коэффициенты сферической aberrации и комы всей системы равнялись нулю. Из этих условий следует:

$$h_3 P_3 = -S_I^0; \quad y_3 P_3 + W_3 = -S_{II}^0; \text{откуда} \quad W_3 = \frac{-S_I^0 - dS_{II}^0}{d}; \quad P_3 = -\frac{2S_I^0}{d};$$

Добавления к коэффициентам  $S_{III}$  и  $S_V$ , вызванные компенсатором, могут быть определены из следующих формул:

$$\Delta S_{III} = \frac{y_3^2}{h_3} P_3 + \frac{2y_3}{h_3} W_3 = \frac{P_3}{2d} - \frac{2W_3}{d} = \frac{1}{d^2} (S_I^0 + 2S_{II}^0)$$

$$\Delta S_V = \frac{y_3^3}{h_3^2} P_3 + \frac{3y_3^2}{h_3^2} W_3 = -\frac{P_3}{2d^2} + \frac{3}{d^2} W_3 = -\frac{1}{d^3} (2S_I^0 + 3dS_{II}^0)$$

Значения  $S_{III}$  и  $S_V$  очень велики при малых  $d$ . Значения  $W_3$  и  $P_3$  тоже велики, что влечет за собой появление aberrаций высших порядков. Это объясняется тем, что условие исправления сферической aberrации большого зеркала с помощью компенсатора благодаря малому значению  $h_3$  на последнем приводит к недопустимо большим значениям коррекционных параметров. Таким образом, применять афокальный компенсатор в сходящемся пучке имеет смысл только тогда, когда aberrация 1-го зеркала уже исправлена путем применения асферической поверхности.

### 13.8. Рефлексоурусары

В этой схеме компенсатор – толстая плоскопараллельная пластина. Сферическое зеркало (СЗ) обладает отрицательной сферической aberrацией, плоскопараллельная пластинка (ППП) – положительную сферическую aberrацию.

цию. Сочетая СЗ с ППП определенной толщины, можно осуществить взаимную компенсацию сферической aberrации. Отметим, что сферическая aberrация  $\Delta S'$  зависит от показателя преломления.

Используются стекла: СТК 19, ТФ 10, СТФ 1. При этом волновая aberrация  $\Delta l < 0,1\lambda$ .

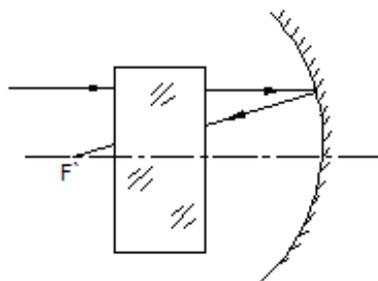


Рис. 13.11. Базовая схема с ППП (в параллельном и сходящемся пучке одновременно)

Обычно стремятся выполнить компенсацию сферической aberrации в средней зоне входного зрачка. При этом возможно развитие большое относительное отверстие; получить светосильную систему с относительным отверстием порядка 1:1. Базовую схему с ППП можно усложнять используя мениски или толстые линзы.

Особенности *синтеза*:

– в базовой схеме отрицательная кривизна; ее устраняют тем, что из толстой ППП вырезают воздушные конфокальные линзы, которые создают дополнительную положительную кривизну в меридиональной плоскости;

– возможно размещать после ППП положительную линзу с конфокальной поверхностью; она способствует увеличению относительного отверстия в разы, определяемые показателем преломления стекла, из которого она выполнена;

– положительный хроматизм положения от ППП можно компенсировать следующим образом: одну из плоских поверхностей заменяют сферической поверхностью с положительной оптической силой, которая обладает положительным хроматизмом положения.

Известны модификации:

В объективе (рис. 13.12, *a*) сферическая aberrация зеркала и ППП близки друг другу по своему характеру, происходит взаимная компенсация и возможно развитие большого относительного отверстия ОС. В схеме (рис.

13.12, б) ППП расположена в параллельных пучках, первая ее поверхность имеет дополнительный коррекционный радиус (для компенсации положительного хроматизма ППП одну из ее плоских поверхностей заменяют сферической поверхностью с положительной оптической силой, обладающей отрицательным хроматизмом положения). Сила введенной сферической поверхности незначительна по абсолютной величине, поэтому ее монохроматические aberrации сравнительно легко устраняются за счет других конструктивных параметров объектива.

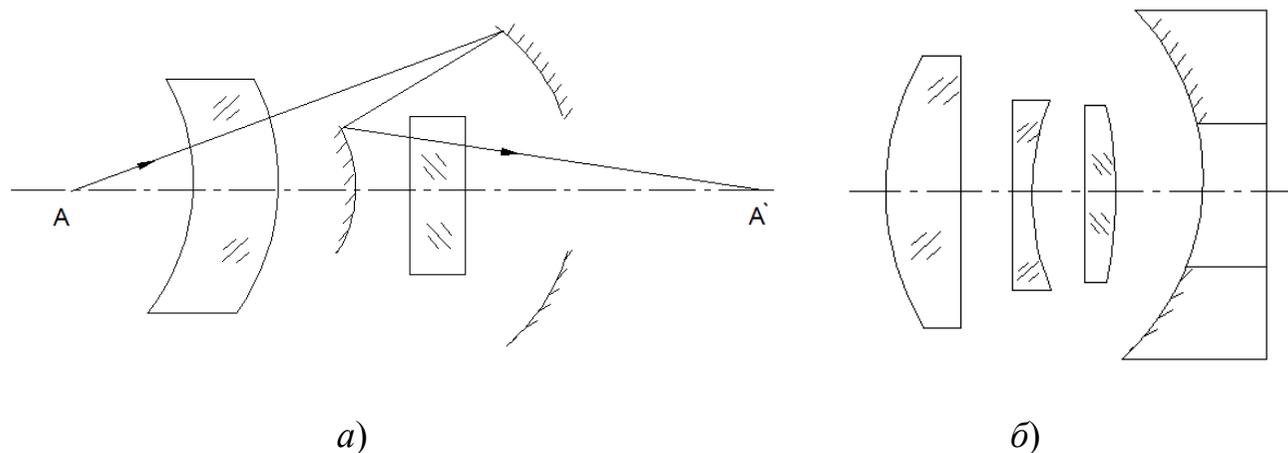


Рис. 13.12. Объектив с ППП: а) объектив с ППП в сходящемся пучке; б) ППП в параллельном пучке

Для устранения отрицательного астигматизма можно также воспользоваться размещением после плоскопараллельной пластинки положительной линзы с конфокальной поверхностью. Такая линза (одновременно с устранением астигматизма) позволяет повышать относительное отверстие объектива пропорционально показателю преломления стекла, из которого она выполнена.

Изложенные приемы синтеза были реализованы при разработке высокосветосильного зеркально-линзового объектива «Рефлексоруссар – 7», схема и графики aberrаций которого приведены на рис. 13.13. Объектив имеет характеристики: фокусное расстояние  $f' = 250$  мм, угловое поле  $2w = 12^\circ$ , относительное отверстие 1 : 1.

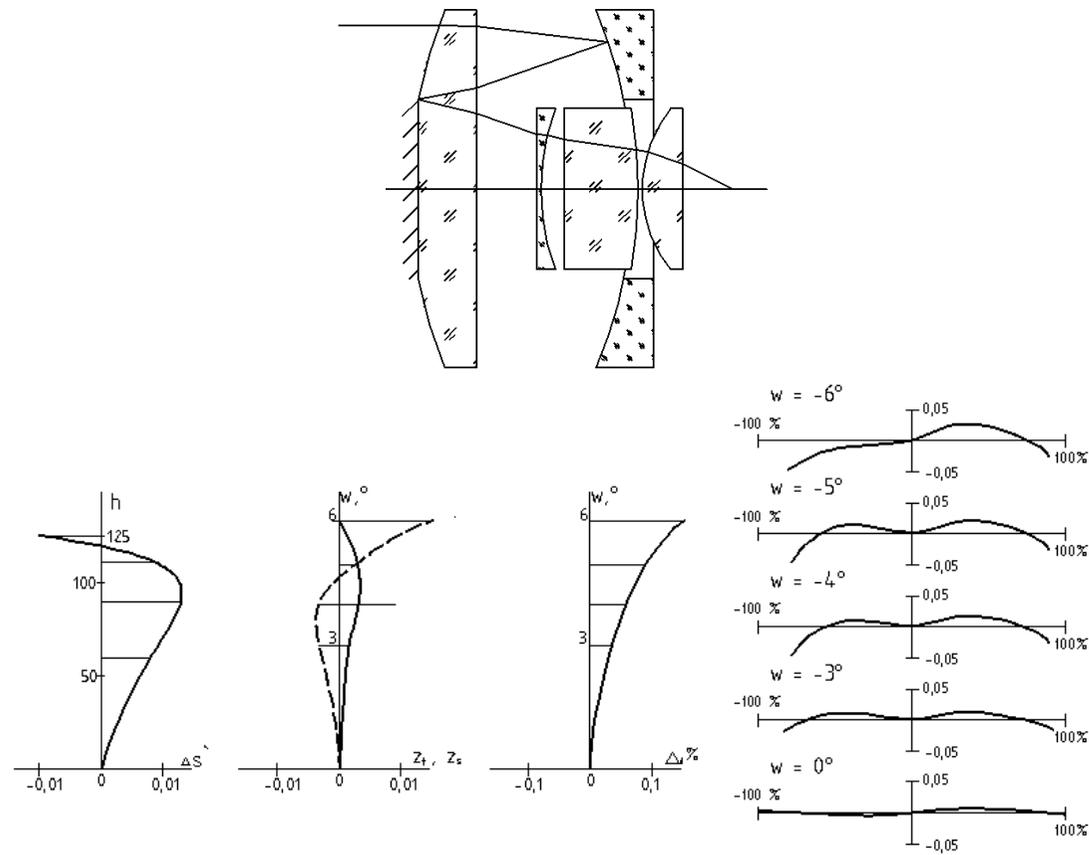


Рис. 13.13. Зеркально-линзовый объектив «Рефлексоруссар – 7»

## 14. НЕТРАДИЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И СИСТЕМЫ

### 14.1. Линза Френеля

*Линзы Френеля* представляют собой оптические детали с одной ступенчатой поверхностью. Используются в осветительных установках, имеют высокую апертуру.

Исправлена сферическая aberrация, причем, чем меньше расстояние между соседними ступеньками, тем точнее выполняется условие уменьшения остаточных aberrаций при малой толщине линзы. Наименьшее достигнутое расстояние между ступеньками равно 0,05 мм. Ступеньки могут быть разграничены концентрическими, спиральными или параллельными канавками и представляют собой участки конических или сферических поверхностей, или же – участки плоскостей или цилиндрических поверхностей.

Достоинства:

- большой диаметр и малая толщина;
- невысокие требования к изготовлению.

Aberrации Френелевых поверхностей, как и сама поверхность, обладают точками разрыва, возникающих при попадании лучей на вершины или впадины. Френелевы ступеньки могут быть и на плоскости. Сохраняют радиусы кривизны всех поверхностей неизменными для всех зон и делают поверхности этих зон концентричными друг другу с общим центром кривизны на оптической оси. Имеем уменьшение сферической aberrации  $\Delta S'$  в три раза.

Материалом для линз Френеля может быть полиметилметакрилат, имеющий следующие характеристики:  $n_d = 1,4903$ ;  $v_d = 57,8$ . Этот материал обладает хорошим пропусканием в УФ области спектра.

Пластмассовые линзы Френеля находят применение в качестве луп, конденсоров, призм, зеркал и других оптических деталей, обеспечивая малые габаритные размеры системы.

Элемент эффективного профиля ступенчатой ассиметричной поверхности, разделяющей среды с показателями преломления  $n = 1$  и  $n_2 = n$ , показан на рис. 14.1.

Расчет линзы производят из условия получения гомоцентрического пучка лучей, образующих изображение осевой точки А, принимая, что каждая ступенька является бесконечно узкой.

Нормаль к рассматриваемому участку профиля пересекает оптическую ось в точке С под углом  $\varphi$ , который определяет положение образующей взятого участка профиля.

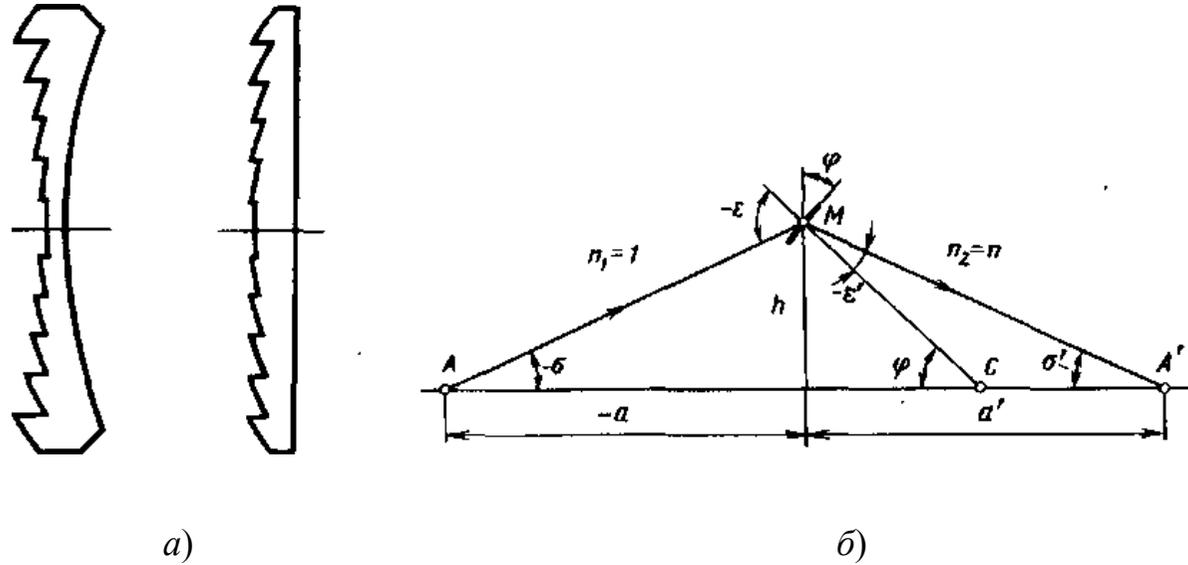


Рис. 14.1: а) линза Френеля; б) элемент эффективного профиля линзы

Углы  $\varphi$ , определяющие, например, наклон профилей конических кольцевых участков ступенчатой преломляющей поверхности, вычисляются по формуле:

$$\operatorname{tg}\varphi = (n\sin\sigma' - \sin\sigma) / (n\cos\sigma' - \cos\sigma) \quad (14.1)$$

где углы  $\sigma$  и  $\sigma'$  предварительно вычисляются по заданным отрезкам  $-a$  и  $a'$  для различных высот  $h$ .

Формулу (14.1) можно использовать для расчета тонкой линзы Френеля с плоской второй поверхностью, aberrациями которой можно пренебречь.

Заднее фокусное расстояние линзы Френеля определяют по значению  $\sigma'$  при  $\sigma = 0$ .

При этом условии из формулы (14.1) имеем:  $\operatorname{tg}\varphi_0 = n\sigma' / (n - 1)$ ;

Следовательно,  $\sigma' = [(n - 1)/n]\operatorname{tg}\varphi_0$ .

Таким образом, при малой высоте:

$$f' = h / \sigma' = hn / [(n - 1)\operatorname{tg}\varphi_0]; \quad (14.2)$$

где  $\operatorname{tg}\varphi_0$  находят по формуле (14.1) при малом значении  $h$ .

Световой диаметр  $D_{\text{св}}$  линзы получается при угле падения луча  $\varepsilon_m = -90^\circ$ . Из рис. 14.1 имеем:

$$\operatorname{tg}\sigma'_A = \operatorname{tg}(\varphi + \varepsilon_m) = D_{\text{св}}/(2a') \quad (14.3)$$

где  $\varepsilon_m$  - предельное значение угла преломления;  $\sigma'_A$  - апертурный угол линзы Френеля в пространстве изображений (угол между оптической осью и крайним лучом, прошедшим через линзу).

Далее путем решения квадратного уравнения, находим световой диаметр линзы Френеля:

$$D_{\text{св}} = [1\sqrt{n^2 - 1}] [a - a' + \sqrt{(a - a')^2 - 4aa'(n^2 - 1)}]. \quad (14.4)$$

## 14.2. Растровые системы

*Оптическим растром* называется совокупность из линзовых или зеркальных элементов (ячеек), имеющих оптическую силу. Расстояние между осями двух смежных элементов, измеренное по нормали к их осям симметрии, называют *периодом* или *шагом растра*. Каждый элемент оптического растра формирует изображение предмета. Таким образом, число полученных изображений предмета равно числу элементов растра. Если оптические силы всех элементов одинаковы, то изображения предмета получаются в одной плоскости (когда оптические элементы безаберрационны). При обратном ходе лучей из отдельных «предметов», полученных в виде закрепленных изображений, восстанавливается пространственное положение предмета.

Действие *растровой осветительной системы* показано на рис. 14.2. Наклонный пучок лучей, идущий от источника света, заполняет входной зрачок последующей ОС. Элементом растра 1 обеспечивается получение изображения центра источника света  $C$ . Элемент растра 2 направляет пучок во входной зрачок.

Период  $t_1$  растра 1 является заданным. Тогда согласно рис. 14.2 период растра 2 равен:

$$t_2 = t_1 \left(1 - \frac{d}{s_1}\right) \quad (14.5)$$

где  $d$  – расстояние между растрами;  $s_1$  – удаление источника света  $C$  от растра.

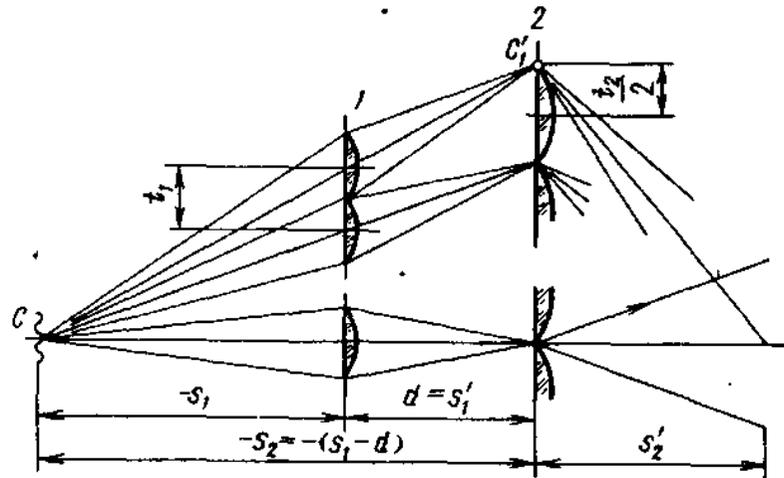


Рис. 14.2. Растровая осветительная система

Число элементов раstra 2 должно быть равно числу элементов раstra 1.

Фокусные расстояния осевых ячеек растров 1 и 2 определяются по формуле:

$$f'_1 = \frac{s_1 d}{s_1 - d}; f'_2 = (s_1 - d) s'_2 / (s_1 - d - s'_2) \quad (14.6)$$

где  $S'_2$  — удаление изображения 3 от раstra 2.

Другим примером применения оптического раstra являются экраны направленного отражения. Зеркальные элементы растрового экрана могут быть сферическими и цилиндрическими.

### 14.3. Градиентная оптика

Перспективной элементной базой для ОС является *градиентная оптика*. В градиентных элементах (грингах) используются прозрачные изотропные среды, в которых показатель преломления есть функция координат точки среды. По виду функции  $n = f(x, y, z)$  различают три типа гринов:

1) с осевым распределением показателя преломления:

$$n = f(z), n(x) = n(y) = \text{const};$$

2) с радиальным (цилиндрическим) распределением:

$$n = f(x^2 + y^2), n(z) = \text{const};$$

3) со сфероконцентрическим распределением:

$$n = f(x^2 + y^2 + z^2)$$

Примером гринов первого типа является сверхпроводящее волокно для систем связи, второго – силовые оптические элементы. В последнем случае традиционные конструктивные параметры дополняются осесимметричным градиентом показателя преломления. Проектирование и исследование оптических систем с градиентными линзами показало, что конструкция систем упрощается (за счет уменьшения числа компонентов).

В градиентной оптике широко используется цилиндрический стержень с показателем преломления  $n$ , который меняется в зависимости от расстояния рассматриваемого элемента от оси оптической системы. Могут служить объективом телескопических систем.

*Градиентные линзы* с радиально уменьшающимся показателем преломления (в параксиальной области по параболическому закону, вне параксиальной области по полиномиальному, то есть парабола переходит в степенной многочлен более высокой степени). Полиномиальное распределение показателя преломления позволяет получить GRIN с лучшим качеством изображения. Пластина, сделанная из такого материала, действует как обычная собирающая линза. Грины увеличенной длины, переносящие изображение с входного торца на выходной носят название selfoc. Грины обычно используются там, где необходимо установить очень много маленьких линз рядом, в таких устройствах как жёсткий эндоскоп, копировальные устройства и сканеры.

Конечно, оптоволокно (градиентное волокно) может быть сделано из радиально-изменяющегося профиля распределения показателя преломления; при его проектировании очень ослабляется дисперсия света в многомодовом оптоволокне. Хрусталик глаза человека также использует радиально уменьшающийся показатель преломления для фокусировки света.

Одно из самых важных преимуществ градиентных линз при сравнении с классическими линзами заключается в том, что оптические поверхности Гринов могут быть плоскими. Этот факт является очень важным при создании связи высокого качества между линзами и, например, оптоволокном. При выпуклых поверхностях сферической формы наличие градиента показателя преломления в линзе (радиального и осевого) эквивалентно действию асферизации поверхности, что позволяет существенно повысить относительное отверстие линзы.

#### 14.4. Киноформы

Дифракционная линза (киноформ) представляет собой периодическую кольцевую структуру, изготавливаемую, например, способом фотолитографии. Киноформ рассматривается как бесконечно тонкий транспарант с заданным амплитудным коэффициентом пропускания. Так как при прохождении пучков лучей через киноформы силовое действие сопровождается изменением в спектральном составе излучения, то эти элементы используют для коррекции не только сферической, но и хроматических аберраций.

Киноформная линза находит применение в системах фокусировки излучения лазера, в дисковых видеопроекторных, в лазерных дальномерах и др., заменяя дорогие многолинзовые объективы. Киноформные элементы позволяют решать такие задачи по управлению световыми пучками, которые решить с помощью традиционных оптических элементов часто не представляется возможным.

*Киноформ цилиндрической линзы.* Бороздки имеют вид не концентрических колец, а прямолинейных параллельных полосок. Их ширина и профиль изменяются по тому же закону, как и у рассмотренного выше киноформа. После прохождения плоской волны образуется яркая линия.

*Киноформный аксикон.* Аксикон — оптический элемент с осевой симметрией, изображающий точечный источник в виде множества точек, располагающихся вдоль оптической оси. Профиль рельефа аксикона: кольцевые бороздки имеют треугольное сечение и повторяются с постоянным шагом вдоль радиуса. Фактически это дифракционная решетка, но не с прямолинейными, а с концентрическими штрихами. С помощью такого аксикона, можно 80% световой энергии собрать в световую линию диаметром 50 мкм и длиной 2 м. При этом максимальная глубина профиля киноформа составила чуть больше 1 мкм. Свойство аксикона формировать световую линию используют для проверки прямолинейности в лазерной технологии, оптических интерферометрах.

*Киноформ прозрачного тора.* В некоторых ОС, в том числе в лазерной технологии, необходимы оптические элементы, концентрирующие световой поток в тонкое кольцо. Для этих целей можно использовать прозрачный тор. При освещении его плоской монохроматической волной можно наблюдать образование яркого узкого кольца. Его используют для вырезания круглых дисков, фокусируя излучение мощного лазера на мишень. Однако процесс изготовления тора, например из стекла, технологически трудный и дорогостоящий. В данном случае целесообразно использовать киноформ тора. С помощью киноформных оптических элементов можно решать самые экзотические задачи формирования световых пучков. Например, для лазерных систем вывода изображений и лазерных измери-

тельных датчиков касания созданы киноформы с повышенной глубиной фокусировки, то есть удлиняющие расстояние вдоль оси, на котором после фокусировки света линзой интенсивность максимальна.

В системах объемного видения роботов, контроля прямолинейности станин в станкостроении, центрировке и монтаже оборудования нашел применение фазовый элемент – линзакон. В этом элементе пространственно совмещены киноформы линзы и аксикона. Линзакон является основным оптическим элементом в приборе “Лазерная струна”, который используется для контроля прямолинейности направляющих больших станков и выставления оборудования по прямой. С помощью этого прибора можно создать световую линию диаметром 50 мкм и длиной до 50 м.

Эффективность записи изображений в лазерных принтерах и сканерах зависит от распределения световой энергии по сечению в фокусе пучка. При поэлементном способе записи оптимальное использование энергии лазера достигается при равномерном распределении интенсивности в фокальном пятне, а при непрерывном способе – кольцеобразное распределение. Эта задача решается при помощи одного оптического элемента, выполняющего одновременно функции дифракционной линзы и осесимметричной фазовой решетки.

Применение киноформов в ОС позволяет сократить число компонентов в них за счет объединения функциональных свойств нескольких элементов в одном. Киноформы в сочетании с обычными оптическими элементами позволяют сократить габариты, массу и стоимость традиционных оптических приборов и создать принципиально новые ОС, не имеющие аналогов (например, двухфокусный микроскоп с пластинкой Вуда – наблюдение микрообъектов, находящихся в различных предметных плоскостях и выставки их вдоль одной линии).

#### 14.5. Асферические линзы

*Анаберрационные линзы.* Преломляющие поверхности 2-ого порядка - гиперболоидная ( $e=n$ ) и эллипсоидная ( $e = \frac{1}{n}$ ), свободные от сферической аберрации в случае бесконечно удаленного предмета, называются *анаберрационными*. У этих поверхностей отсутствует сферическая аберрация третьего  $\Delta s'_{III}$ , пятого  $\Delta s'_V$ , седьмого  $\Delta s'_{VII}$  и далее, т.е.

$$\Delta s' = \Delta s'_{III} + \Delta s'_V + \Delta s'_{VII} + \dots = 0,$$

где  $\Delta s'_{III} = 0, \Delta s'_V = 0, \Delta s'_{VII} = 0 \dots$

Асферические линзы плоскогиперболоидная и сфероэллипсоидная с исправленной сферической aberrацией называют анаберрационными линзами или линзами Декарта (рис. 14.3). В отличие от апланатических линз анаберрационные линзы дают действительное изображение и применяются самостоятельно.

Одна анаберрационная линза по своим aberrационным возможностям заменяет 2-3 сферические линзы и позволяет получить высокое относительное отверстие вплоть до теоретического предела, если нет ограничений по величине комы.

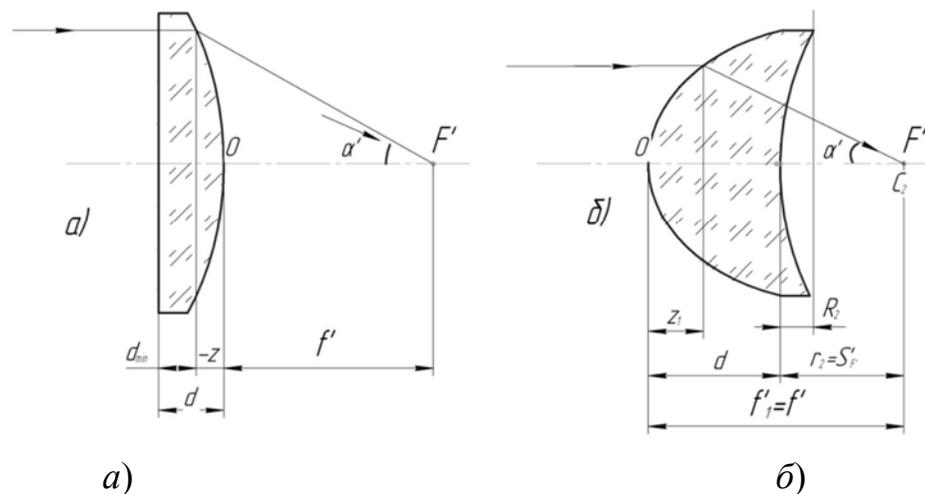


Рис. 14.3. Анаберрационные линзы: а – плоскогиперболоидная линза; б – сфероэллипсоидная линза

Но у этих линз не выполняется условие синусов ( $\Delta f' \neq 0$ ), что вызывает появление меридиальной комы, поэтому они имеют небольшое угловое поле, уменьшающееся с увеличением относительного отверстия.

Плоскогиперболоидные линзы применяются в качестве конденсоров, для концентрации лазерного излучения, а также в схемах контроля асферических зеркал. Использование их в симметричных комбинациях позволяет создать ОС, свободную от сферической aberrации, комы, дисторсии и хроматизма увеличения.

Если в выпуклоплоской линзе (линзе благоприятной формы) первую поверхность заменить на параболоидную, то сферическая aberrация уменьшится в 1,4 раза, изменив знак. Плоскопараболоидная линза при расположении входного зрачка в передней фокальной плоскости становится *анастигматической* и применяется в качестве базовой в широкоугольных объективах.

В гидросъемочных объективах в качестве передней линзы используют плоскоэллипсоидную отрицательную линзу, в которой исправлен астигматизм и дисторсия.

Асферические линзы, рассмотренные выше, относятся к деталям, имеющим круговую симметрию. Они дают изображение, имеющие одинаковый масштаб во всех направлениях.

**Цилиндрические линзы.** В линзах двоякой симметрии две взаимно перпендикулярные плоскости симметрии, где изображение с различным масштабом изображения. Они называются трансформированными (анаморфозными); к ним относятся *цилиндрические* и *торические линзы*: плоскоцилиндрические, сфероцилиндрические, торические.

*Анаморфотные ОС* используются в приборах для научных исследований, фотограмметрии, широкоэкранный кинематографе, полиграфии, осветительных приборах, звукозаписывающей и звуковоспроизводящей аппаратуре и т.п. Цилиндрические и торические линзы используются в очковой оптике.

Основной характеристикой трансформированного изображения является коэффициент трансформирования для высоты и ширины изображения и коэффициентом анаморфозы.

Цилиндрическая линза даже в параксиальной области даёт астигматическое изображение. В меридиональном сечении действие линзы аналогично действию плосковыпуклой линзы, а в сагиттальном аналогично плоскопараллельной пластинке (рис. 14.4).

Величина заднего отрезка

$$s^{\circ} = \frac{(sn-d)r}{(sn-d)(n-1)+rn}$$

Длина изображения в сагиттальном сечении зависит от длины  $l$ , линейного увеличения  $\beta_1$  в меридиональной плоскости:

$$x'_{II} = (1-\beta_1)l.$$

Вследствие aberrаций отрезок  $A'A''$  практически искривлён и обращён вогнутостью к линзе. Свойство линзы изображать точку в виде отрезка прямой используется в конденсорах спектральных приборов.

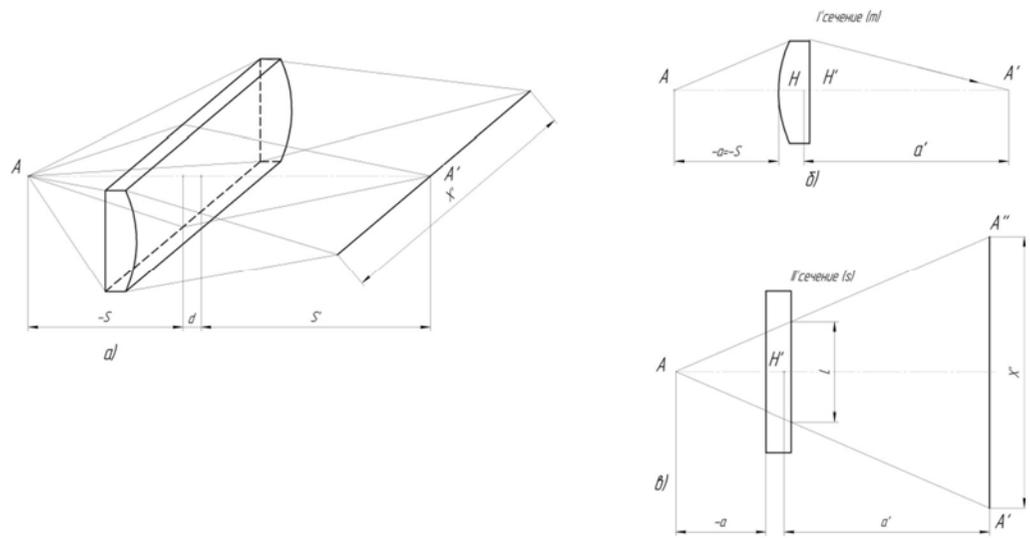


Рис. 14.4. Образование изображения точки на оси ( $s_1 \neq -\infty$ ) плоскоцилиндрической линзой:  
 $a$  – общий вид;  $b$  – меридиональное сечение;  $v$  – сагиттальное сечение

### 14.6. Аксиконы

**Аксиконы** вызывают значительное нарушение гомоцентричности осевого пучка лучей и образуют изображение в виде осевого отрезка большой длины.

Этим свойством обладают аксиконы большой сферической аберрации: *конические и сферические*, или *линзовые аксиконы* или вследствие большого продольного хроматизма: *хроматические аксиконы*.

Впервые этот оптический элемент был предложен Мак-Леодом (рис. 14.5) и далее изучен Стилом, который предложил линзу-мениск с отрицательными радиусами кривизны поверхностей, имеющую большую отрицательную сферическую аберрацию (*линзовый аксикон*).

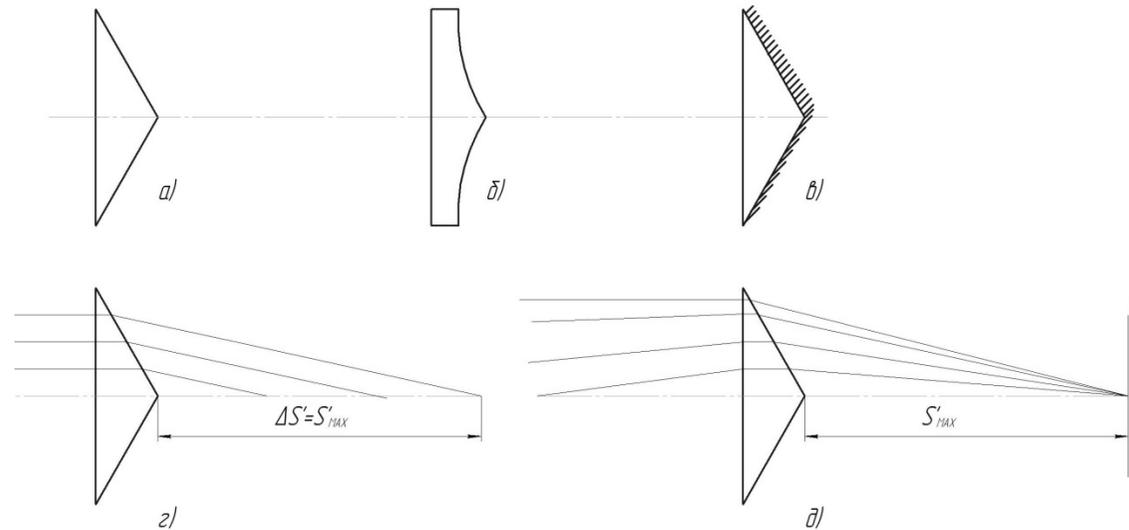


Рис. 14.5. Конические аксиконы Мак-Леода: *а*, *б*, *в* – виды аксиконов; *г* – образование изображения бесконечно удалённой точки разными зонами аксикона; *д* – образование изображений разноудалённых осевых точек предмета в плоскости сетки

Аксиконы с асферическими поверхностями различной формы и зеркальные аксиконы более трудны в изготовлении. Особенностью образования изображения аксиконом состоит в том, что точки изображения  $A_1, A_2, A_3 \dots$  строятся узкими кольцевыми зонами детали, а не всем диаметром, как в случае исправленной сферической аберрации, что снижает освещённость изображения. Свойства аксикона определили области его применения.

1. Для создания объективов, не требующих фокусировки при изменении положения предмета (визирной цели) в виде светящейся точки.
2. Для создания заданного распределения освещённости в плоскости изображения.
3. Для формирования пучка лучей с нулевой интенсивностью в центре пучка.
4. Для компенсации в системах сферической аберрации, вносимой другими компонентами.

Аксикон используют в зрительных трубах геодезических приборов и оптико-электронных контрольно-измерительных приборах в качестве объектива. При его использовании не требуется выполнять перефокусировку трубы при изменении расстояния до марки (рис. 14.5, *д*). По точности визирования зрительная труба с коническим аксиконом предпочтительней, чем с линзовым.

**Сферические аксиконы** – склеенные линзы (рис. 14.6), которые легче изготовить, чем конический аксикон.

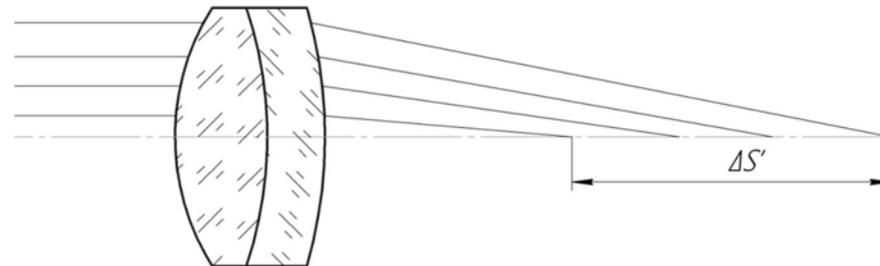


Рис.14.6. Сферический аксикон с большой положительной сферической аберрацией

**Аксиконные насадки** представляют собой плоскопараллельную пластину, состоящую из двух линз – положительной и отрицательной, склеенных по сферической поверхности (рис. 14.7). При использовании насадки совместно с обычным объективом получаем систему со свойствами аксикона.

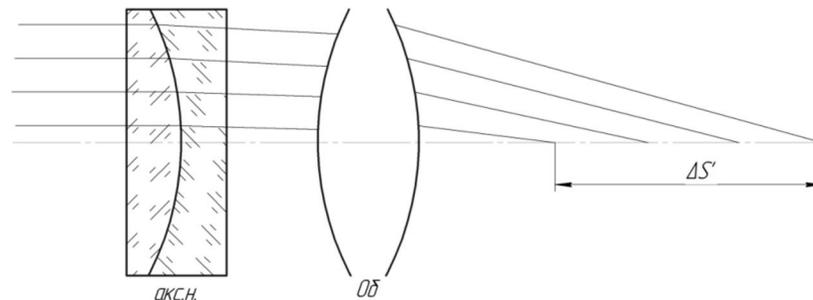


Рис. 14.7. Система «аксиконная насадка + обычный объектив», обладающая свойствами конического аксикона.

**Хроматические аксиконы** обладают большим хроматизмом положения (рис. 14.8). На рис. 14.8, б показан хроматический аксикон в качестве объектива, дающий без перефокусировки изображения разноудаленных точек (марка в виде перекрестия); их изображения имеют разный цвет в зависимости от расстояния до предмета и окружены слабым цветным фоном. На рис. 14.8, а показано образование изображения бесконечно удаленной точки предмета на оси: лучи, параллельные оптической оси, на всех высотах после преломления образуют изображения в тех же точках  $F'_F, F'_e, F'_{e'}$



## **ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

### **СОДЕРЖАНИЕ**

#### **ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ**

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАКСИАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАМЕТРОВ ДВУХЛИНЗОВОГО ОБЪЕКТИВА

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ АБЕРРАЦИИ ОБЪЕКТИВА И СОСТАВЛЯЮЩИХ ЛИНЗ

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ АБЕРРАЦИЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С НЕСФЕРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ АБЕРРАЦИЙ ОСЕВОЙ ТОЧКИ

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ АБЕРРАЦИЙ ВНЕОСЕВОЙ ТОЧКИ ДЛЯ ОБЪЕКТИВА И ЛИНЗ

Лабораторная работа №6

СИНТЕЗ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Лабораторная работа № 7

КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ КОЛЛИМИРУЮЩИХ СИСТЕМ

Лабораторная работа №8

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ФОКУСИРУЮЩИХ СИСТЕМ

Требования к выполнению лабораторных работ

КРАТКОЕ РУКОВОДСТВО ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ ПАКЕТА ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ OPAL – PC

#### **ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ**

Примеры решения задач

Индивидуальные вопросы для самостоятельной работы

## КУРСОВАЯ РАБОТА

Цель и задачи курсового проектирования

Содержание курсовой работы и требования к его оформлению

Последовательность выполнения курсовой работы

Оформление технической документации на рассчитанную оптическую систему.

Порядок защиты курсовой работы

## КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

Средства диагностики

Критерии оценки результатов учебной деятельности

Контрольные задания по темам учебной дисциплины

Вопросы к зачету по дисциплине

Вопросы к экзамену по дисциплине

Примерный перечень контрольных вопросов к лабораторным работам

## ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

ВЫДЕРЖКИ ИЗ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ ДИСЦИПЛИНЫ

ГЛОССАРИЙ

## ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

### Лабораторная работа № 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАКСИАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАМЕТРОВ ДВУХЛИНЗОВОГО ОБЪЕКТИВА

**Цель работы:** применение и углубление теоретических знаний о параксиальных параметрах ОС. Изучение ППП «OPAL» для выполнения параксиальных расчетов на ПЭВМ.

**Оборудование и принадлежности к работе:** ПЭВМ, ППП «OPAL», электронный ключ защиты.

#### Краткая теория

Двухлинзовые объективы широко применяются в оптических приборах. Их используют в качестве одиночных компонентов и в составе сложных ОС различного назначения: фото-; кино-; микро-; проекционных объективах, окулярах. При соответствующем выборе марок стекол исправляют три аберрации.

Наиболее распространенной двухлинзовой системой является ОС, в которой одна линза положительная, а вторая – отрицательная. Склеенные объективы (рис. 1, а, б) применяют в двух комбинациях: «крон впереди» или «флинт впереди». Кронные стекла более устойчивы к атмосферным и механическим воздействиям. При угловых полях  $2\omega = 1-2^\circ$  и относительных отверстиях порядка 1:10 объективы дают высокое качество изображения и их применяют в астрономических, геодезических и контрольно-юстировочных приборах. Двухлинзовые склеенные объективы дают хорошее качество изображения (продольная сферическая аберрация не более 0,1–0,2% фокусного расстояния) при относительных отверстиях не более 1: 4 и угловых полях  $2\omega \leq 6^\circ$ .

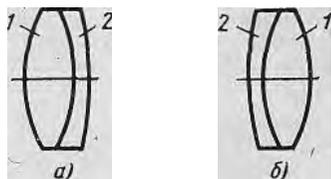


Рис. 1.1. Виды склеенных объективов

Таблица 1.1. Зависимость фокусного расстояния  $f'$  от относительного отверстия

$1 : K$	1:4	1:5	1:6	1:8	1:12
$f'$ , мм	150	300	500	1000	1000

Если aberrации окуляра или других оптических компонентов частично компенсируют aberrации склеенного объектива, то характеристики объектива могут быть увеличены до значения 1:2 и по угловому полю до  $2\omega = 8-11^\circ$  для комбинации – «крон впереди» и до  $2\omega = 5^\circ$  – «флинт впереди».

Если диаметры линз объективов превышают 60–70 мм, то линзы не склеивают. Двухлинзовый несклеенный объектив (рис. 1.2) за счет изменения расстояния между линзами имеет несколько большие по сравнению со склеенным возможности по улучшению качества изображения и получению заданного фокусного расстояния. Недостатками несклеенных объективов являются:

- больше потери на отражение, чем в склеенном,
- больше вероятность появления паразитных бликов,
- трудности при сборке и центрировке.

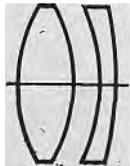


Рис. 1.2. Двухлинзовый несклеенный объектив.

Вторичный спектр двухлинзовых объективов – ахроматов составляет примерно  $1/2000f'$ , поэтому в длиннофокусных объективах эта aberrация вызывает заметное ухудшение качества изображения, что требует апохроматической коррекции.

Параксиальные характеристики объективов в ППП «Опал»:

$f, f'$  – переднее (заднее) фокусное расстояние в мм;  $S_F, S'_F$  – передний (задний) фокальный отрезок в мм;  
 $S_H, S'_H$  – расстояния от вершины первой (последней) поверхности до передней (задней) главной точки ;  
 $S$  – передний отрезок (мм от первой поверхности или дптр. от входного зрачка);

$S'$  - рабочий задний отрезок (мм, дптр.), показывающий положение реальной плоскости установки, т.е. плоскости регистрации изображения;

$S'_g$  - задний отрезок (мм, дптр.), показывающий положение изображения, сопряженного с предметом;

$S_p, S'_p$  – положение входного (выходного) зрачка системы;

$V$  – обобщенное увеличение; определяемое в параксиальной области как отношение обобщенной величины изображения (мм или радианах) к обобщенной величине предмета (мм или радианах).

Для удаленного предмета (изображения) положение входного (выходного) зрачка отсчитывается в мм от первой (последней) поверхности системы. Для близкого предмета (изображения) положение входного (выходного) зрачка отсчитывается в диоптриях от предмета (изображения).

Величина изображения определяется в плоскости установки, соответствующей отрезку  $S'$ .

### Порядок выполнения работы

1. По заданным конструктивным параметрам (радиусы поверхностей, толщины и воздушные промежутки, марки оптических материалов) определить на ПК эквивалентные параметры  $f, f', S_F, S'_F$  двухлинзового объектива, а также параксиальные параметры отдельных линз, входящих в схему объектива. Код стекла (в цифровом виде) выбрать по каталогу оптического стекла (РФ). Выполнить режим «Масштабирование» для  $f=100$ мм. При определении параксиальных элементов в пространстве предметов использовать режим «Перестройка» и «Обернуть». При определении параксиальных элементов отдельных линз использовать режим «Выделить указанное» в работе «Описание оптической системы».

2. Используя формулы для идеальной ОС и параксиальной оптики, определить передний отрезок  $S$  по заданному линейному увеличению  $\beta$  и проверить правильность решения задачи, поставленной в варианте задания. Рассчитать заданный отрезок  $S'$  с использованием углов нулевого луча по режиму расчета «Нулевые лучи» в подменю «Суммы Зейделя».

3. Принимая  $S_1=S$ , определить увеличение  $\beta_1$  и положение изображения после первой линзы  $S_1'$ . Определив  $S_2$ , найти увеличение  $\beta_2$  и положение изображения  $S_2'$ ;

4. Построить изображение графически через двухлинзовый объектив и через каждую линзу в отдельности с помощью ППП «OPAL». Изображение должно быть действительным.

### Содержание отчета

1. Рассчитанные на ПК  $f, f', S_F, S'_F$  склеенного объектива и каждой линзы в отдельности.
2. Расчеты по формулам идеальной ОС на основании заданных исходных данных для склеенного объектива и отдельных линз.
3. Расчет переднего отрезка  $S$ .
4. Результаты проверки на ПК.
5. Три чертежа объектива и отдельных линз с указанием положения главных плоскостей и фокусов.
6. Три чертежа с построением хода лучей через склеенный объектив и отдельные линзы.
7. Заключение.

## Лабораторная работа № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ АБЕРРАЦИИ ОБЪЕКТИВА И СОСТАВЛЯЮЩИХ ЛИНЗ

**Цель работы** – закрепление теоретических знаний по теории сферической абберации.

**Оборудование:** ПЭВМ, ППП «OPAL», электронный ключ защиты.

#### Краткая теория

Если условиться определять положение лучей в пространстве линейными или угловыми координатами, то отступление значений этих координат в реальной системе от их значений, вычисленных по формулам гауссовой или параксиальной оптики, есть геометрические *абберации* для определенной длины волны. Абберации являются критерием оценки, по которому можно судить о степени приближения реальной к ИОС.

*Сферическая абберация* – нарушение гомоцентричности прошедших через оптическую систему широких пучков лучей, выходящих из точки предмета, расположенной на оптической оси системы.

Пучок лучей после выхода из ОС перестает быть гомоцентрическим, но сохраняет симметрию своего строения. Изображение точки – кружок рассеяния, радиус которого в плоскости параксиального изображения называется *поперечной сферической абберацией*  $\delta y' = \Delta S' \operatorname{tg} \sigma'_A$ . Размер кружка рассеяния зависит от положения плоскости установки.

Меридиональная и сагиттальная составляющие	$\delta y'_{cf} = r^3 \cos \theta_A;$ $\delta x'_{cf} = r^3 \sin \theta_A.$	2.1
Фигура рассеяния– окружность	$(\delta y'_{cf})^2 + (\delta x'_{cf})^2 = (Ar^3)^2 = R^2_{cf}.$	2.2
Продольная сферическая абберация	$\Delta S' = S' - S'_0$	2.3
Поперечная сферическая абберация	$\delta y' = \Delta S' \operatorname{tg} \sigma'_A$	2.4

Плоскость, перпендикулярная оптической оси, в которой диаметр кружка рассеяния минимальный, называется плоскостью наилучшей установки (ПНУ). В области aberrаций 3-го порядка величина смещения ПНУ относительно плоскости Гаусса:  $\Delta = \frac{3}{4} \Delta S'_{кр}$ .  $\Delta S'_{кр}$  – aberrация для лучей, идущих через край входного зрачка.

### **Порядок работы**

1. В соответствии с индивидуальным заданием определить сферическую aberrацию склеенного объектива для трех длин волн  $F'$ ,  $e$ ,  $c'$ . Составить таблицу aberrаций и построить графики. Определить максимальный диаметр кружка рассеяния, учитывая распределение световой энергии по ТД (допускаемая величина –80%).
2. Определить сферическую aberrацию первой линзы, составить таблицы aberrаций, построить графики и определить максимальную величину диаметра кружка рассеяния по точечной диаграмме. Найти смещение ПНУ.
3. Изменяя прогиб линзы, найти форму, дающую минимум сферической aberrации. Результаты исследования оформить в виде графиков и таблиц.

### **Содержание отчета**

1. Цель работы и содержание индивидуальных заданий.
2. Расчеты, таблицы и графики сферической aberrации и хроматизма положения склеенного объектива.
3. Расчеты, таблицы и графики сферической aberrации отдельной линзы.
4. Определение значений диаметров кружков рассеяния.

### Лабораторная работа № 3

## ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ АБЕРРАЦИЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С НЕСФЕРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

**Цель работы:** применение теоретических знаний для расчета ОС с несферическими поверхностями.

**Оборудование:** ПЭВМ, ППП «ORAL», электронный ключ защиты.

### Краткая теория

Использование асферики в ОС давно известно: афокальная система Мерсенна, составленная из двух параболических зеркал; схемы Грегори и Кассегрена. Хорошо зарекомендовав себя в осветительных системах и в астрономической оптике, НП имеют ограниченное применение. Это объясняется трудностями изготовления и контроля и недостаточной изученностью их методов расчета.

Требуется существенное повышение оптических характеристик разнообразных оптических приборов в качественном отношении (повышение разрешающей способности) и в количественном (развитие полей зрения и светосилы). Поэтому необходимо расширять техническую базу при разработке ОС, что включает более широкое применение НП. Их использование позволяет решать эти задачи без усложнения оптических схем, т.е. без увеличения их габаритных размеров и массы.

Главными направлениями в области разработки ОС с аферикой являются следующие:

- более глубокое изучение свойств НП 2-го порядка – их воздействие на полевые aberrации;
- использование малых деформаций сферических поверхностей для исправления неэлементарных aberrаций (aberrаций высших порядков);
- применение глубоких НП, позволяющих значительно улучшить светораспределение по полю зрения и создавать ортоскопические особоширокоугольные объективы с полями зрения порядка  $2\omega = 135^\circ$  (и даже  $148^\circ$ );
- использование НП с вольевым профилем от эволюты в виде окружности, обладающих aberrациями 2-го порядка (они отличаются большей технологичностью изготовления, обеспечивающей стабильность получения заданного профиля).

Одним из немаловажных элементов использования НП является их правильное размещение внутри оптической системы, позволяющее воздействовать на различные aberrации.

Особый интерес имеют афокальные компенсаторы в виде плоскопараллельных пластинок с одной деформированной поверхностью.

*Свойства несферических поверхностей.* Центрированная НП характеризуется уравнением своей образующей или заданием ряда координат отдельных точек. Иногда профиль поверхности определяется уравнением 2-го порядка – эллипсом, параболой или гиперболой.

*Несферические поверхности вращения второго порядка.*

Уравнение вокруг оси  $Z$  имеет вид:

$$f(x, y, z) = z - r_0 \frac{u + (1 - e^2)z^2}{2} = 0, \quad (3.1)$$

где  $u = x^2 + y^2$ .

Параметры уравнения (3.1.):  $r_0 = \frac{1}{R_0}$  – кривизна при вершине;  $R_0$  – радиус кривизны;  $e^2$  – квадрат эксцентриситета образующей. Для  $r_0 = 0$  значение  $e^2$  безразлично, и поверхность переходит в плоскость.

Возможны следующие виды поверхностей:  $e^2 = 0$  – сфера;  $0 < e^2 < 1$  – эллипсоид вращения (вытянутый);  $e^2 = 1$  – параболоид вращения;  $e^2 > 1$  – гиперболоид вращения;  $e^2 < 0$  – эллипсоид вращения (сплюснутый). Задание эллипсоидов и гиперболоидов вращения с помощью их полуосей  $a$  и  $b$ , связь которых с параметрами  $R$  и  $e^2$  определяется выражениями: а) для гиперболоида  $e^2 = 1 + \frac{b^2}{a^2}$ ; б) для эллипсоида  $e^2 = 1 - \frac{b^2}{a^2}$ .

Конус можно рассматривать как предельный случай гиперболоида вращения при  $R = 0$ , когда  $e^2 = 1 + \operatorname{tg}^2 \alpha$ , где  $2\alpha$  – угол при вершине конуса. В ППП ОРЛ радиус при вершине конуса равен 0,01, а знак радиуса выбирается по ориентации рабочей полости. При расчете параксиальных лучей конус не учитывается.

*Поверхности вращения высшего порядка.* Базовое уравнение поверхности вращения высшего порядка образуется из уравнения (3.1) добавлением деформации высшего порядка:

$$f(x, y, x) = z - r_0 \frac{u + (1 - e^2)z^2}{2} - Q = 0 \quad (3.2)$$

Член  $Q$  описывает деформацию высшего порядка относительно базовой поверхности второго порядка вдоль нормали к поверхности. Дополнительными параметрами НП высшего порядка кроме радиуса кривизны при вершине  $R$  или кривизны  $r$  и квадрата эксцентриситета  $e^2$ , являются: тип деформации высшего порядка ("U" - тип или "Z" – тип), нормировочный фактор  $h_y$  или  $h_z$  и коэффициенты  $a_2, a_3, b_3, b_4$ . Нормировочный фактор используется для удобства задания коэффициентов. Если задать его равным половине светового диаметра поверхности для типа "U" или стрелке прогиба поверхности для типа "Z", то значения коэффициентов будут близки к величинам деформаций соответствующих порядков на краю светового диаметра.

*Цилиндры и торы.* Цилиндры второго порядка описываются уравнением (3.2), если в нем положить  $u = x^2$  для цилиндра, образующая которого параллельная оси  $Y$  или  $u = y^2$  для цилиндра, образующая которого параллельная оси  $X$ . При  $e^2 = 0$  получаются круговые цилиндры, с осью параллельной оси  $X$  или  $Y$ . Цилиндры с осью, совпадающей с осью  $Z$ , в ППП ОРАЛ не используются.

*Торы* получаются вращением окружности вокруг оси, лежащей в ее плоскости, но не проходящей в общем случае через центр окружности.

### **Порядок работы.**

1. В соответствии с индивидуальным заданием рассчитать геометрические aberrации базовой системы: сферическую продольную  $\Delta S'$  и поперечную  $\Delta y'$  aberrации; астигматизм; кривизну изображения; дисторсию.

2. Исследовать значения вышеуказанных aberrаций при следующих изменениях квадрата эксцентриситета:  $e^2 = \pm 0,05; \pm 0,1$ .

3. Составить таблицу влияния параметра « $e^2 = \pm 0,05$ » на aberrации.

4. Построить графики aberrаций исходной системы (сферической, астигматизма, комы).

### **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Теоретическая часть.
3. Чертеж ОС с заданными параметрами.
4. Значения и графики aberrаций исходной ОС.

5. Таблицы результатов расчета aberrаций при изменении  $e^2$ .
6. Заключение.

### Примеры индивидуальных заданий.

1. Двухзеркальный объектив с 3-мя отражениями.  $f' = -2031,955$  мм;  $D : f' = 1 : 5$ ;  $2\omega = 2^\circ$

Радиус поверхности	Уравнение поверхности	Осевое расстояние
$r_1 = -1979,88$	$y^2 + z^2 + 3959,76x - 0,52608x^2 = 0$	$d_1 = -571,687$
$r_2 = -979,9265$	$y^2 + z^2 + 1959,853x - 3,0319x^2 = 0$	$d_2 = -571,698$
$r_3 = -1963,34$	$y^2 + z^2 + 3926,68x - 0,90317x^2 = 0$	

2. Афокальная квартпараболическая система первого типа.  $\Gamma = -15^x$ ;  $D_{\text{вх.зр.}} = 500$  мм;  $2\omega = 40'$

Радиус поверхности	Уравнение поверхности	Осевое расстояние
$r_1 = -1000$	$y^2 + z^2 + 2000x = 0$	$d_1 = -666,67$
$r_2 = 333,333$	$y^2 + z^2 - 666,67x = 0$	$d_2 = 666,67$
$r_3 = -200$	$y^2 + z^2 + 400x = 0$	$d_3 = -400$

3. Афокальная система  $\Gamma = -6^x$ .  $D_{\text{вх.зр.}} = 500$  мм;  $2\omega = 1^\circ 10'$

Радиус поверхности	Уравнение поверхности	Осевое расстояние
$r_1 = -810,75$	$y^2 + z^2 + 1621,5x = 0$	$d_1 = -292,54$
$r_2 = -309,25$	$y^2 + z^2 + 618,5x - 2,029918x^2 = 0$	$d_2 = 667,54$
$r_3 = -500$	$y^2 + z^2 + 1000x = 0$	

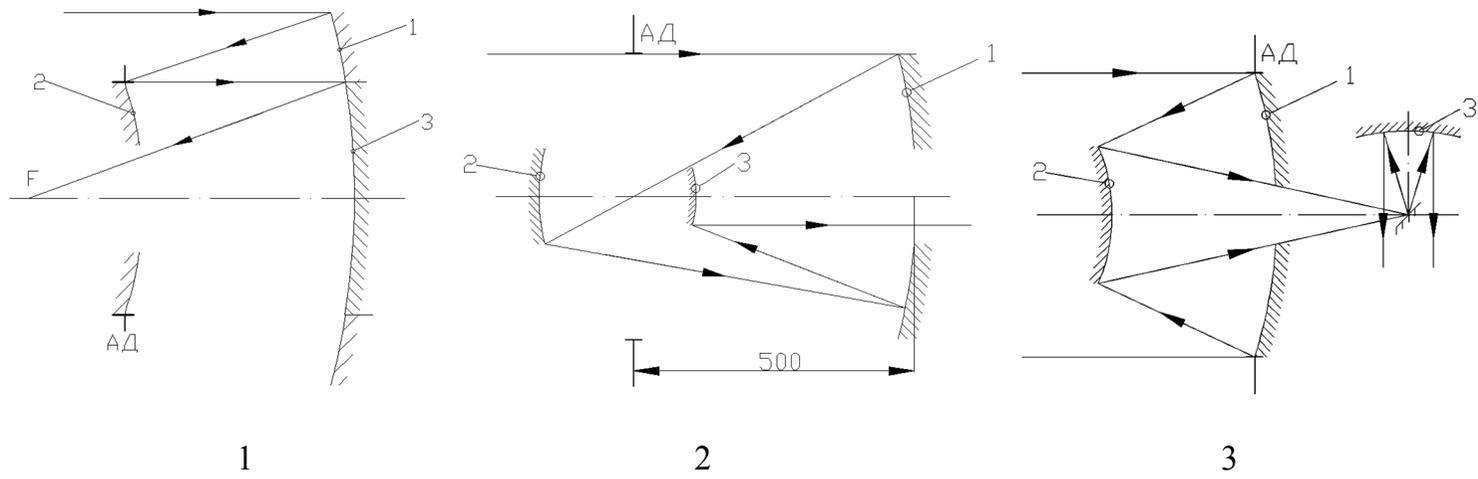


Рис. 3.1. Зеркальные системы

## Лабораторная работа № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ АБЕРРАЦИЙ ОСЕВОЙ ТОЧКИ

**Цель работы:** закрепление теоретического материала и приобретение практических навыков расчета сферической и сферохроматической aberrаций, хроматизма положения; изучение влияния оптической силы линзы и ее прогиба на величину сферической aberrации, определение ПНУ и диаметра кружка рассеяния.

**Оборудование:** ПЭВМ, ППП «ОРАЛ», электронный ключ защиты.

### *Краткая теория*

В изображении осевой точки в монохроматическом излучении, присутствует только одна aberrация – сферическая. Сферическая aberrация – это aberrация широкого осевого пучка лучей, характеризующаяся тем, что лучи, выходящие из осевой точки и падающие на линзу на разных высотах, пересекают оптическую ось в разных местах. Величина продольной и поперечной сферической aberrации соответственно равны:

$$\Delta S' = S' - S'_0$$

$$\Delta y' = \Delta S' \cdot \operatorname{tg} \sigma'$$

Поперечная сферическая aberrация определяет диаметр кружка рассеяния  $d_{кр.п.} \approx 2\Delta y'$ .  $\sigma'$  – задний апертурный угол;  $\delta$  – смещение плоскости установки вдоль оптической оси.

Для осевой точки поля определяется также отступление от условия изопланатизма  $\eta$ .

Если предмет находится в бесконечности, то  $\eta = \left( \frac{m}{\sin \sigma'} - f'_0 + \frac{f'_0 \Delta S'}{S'_{p'} - S'} \right) \frac{1}{f'_0} = \frac{\Delta f'}{f'_0} + \frac{\Delta S'}{S'_{p'} - S'}$ , (4.1)

Если предмет находится на конечном расстоянии, то  $\eta = \frac{n \sin \sigma}{\beta_0 n' \sin \sigma'} - 1 + \frac{\Delta S'}{S'_{p'} - S'} = \frac{\Delta \beta}{\beta_0} + \frac{\Delta S'}{S'_{p'} - S'}$  (4.2.)

Если условие изопланатизма выполнено, то все точки бесконечно малого элемента плоскости, перпендикулярной оптической оси, будут изображаться с одинаковыми погрешностями или недостатками. Для небольшого линейного поля меридиональная кома приблизительно равна:

$$k = 3y' \cdot \eta. \tag{4.3.}$$

Если ОС работает в широком спектральном диапазоне, то кроме сферической aberrации на оптической оси возникает *хроматизм положения*. Хроматизм положения – это aberrация параксиальной области (гауссовы плоскости изображения для разных длин волн не совпадают). Если хроматизм положения исправлен, сферическая aberrация для разных длин волн имеет разные значения. Хроматическая разность сферических aberrаций носит название сферохроматической aberrации:

$$\Delta S'_{F'} - \Delta S'_{c'} = (S'_{F'} - S'_{c'})_m - (S'_{F'} - S'_{c'})_0, \quad (4.4.)$$

где индексы « $m$ » и 0 указывают на то, что лучи определены на разных высотах в плоскости входного зрачка.

Положительные линзы имеют отрицательную сферическую aberrацию и наоборот. Комбинируя положительные и отрицательные линзы, исправляют сферическую aberrацию. Ее величина для отдельной линзы зависит от прогиба линзы, апертурного угла, положения предмета и значения фокусного расстояния.

Для любого отрицательного увеличения и  $\beta = 0$  (предмет находится в бесконечности) может быть найдена форма линзы с минимальной сферической aberrацией (если предмет находится в бесконечности и показатель преломления стекла линзы  $n = 1,5$ , то минимум сферической aberrации соответствует отношению радиусов  $r_1 : r_2 = 1 : (-6)$ , т.е. линза обращена выпуклостью к падающему пучку).

Хроматизм положения положительных линз отрицательный, а отрицательных – положительный. Комбинируя такие линзы с разными коэффициентами дисперсии  $\nu_e$ , можно исправлять хроматизм положения. При наличии сферохроматической aberrации хроматизм 3-го порядка исправляют для  $m \approx 0,75$ .

### **Практическая часть**

#### **1. Задание для работы:**

1.1. В соответствии с индивидуальным заданием определить aberrации осевой точки склеенного объектива. Составить таблицу aberrаций и построить графики; определить приблизительный диаметр кружка рассеяния. Посмотреть ТД и сравнить кружок рассеяния, определенный по значениям aberrаций с точечной диаграммой. Определить на ПК диаметр кружка рассеяния по уровню 80% энергии.

1.2. Определить aberrации осевой точки для первой линзы. Составить таблицу aberrаций и построить графики. Для основной длины волны определить максимальный диаметр кружка рассеяния.

1.3. Изменяя прогиб первой линзы, найти форму линзы с минимальной сферической aberrацией.

1.4. Определить сферическую aberrацию второй линзы. Сделать таблицу aberrаций и построить графики.

2. Указания по выполнению работы:

2.1. Для п. 1.1: определяются сферическая aberrация (продольная, поперечная, волновая), хроматизм положения (на оси), сферохроматическая aberrация для двух зон входного зрачка. Максимальный диаметр кружка рассеяния равен  $d_{кр.р.} \approx 2\Delta y'$ . Анализ качества изображения производится в геометрическом приближении.

2.2. П. 1.2. – определить aberrации первой линзы, плоскость установки, где диаметр кружка рассеяния будет минимальным. Установлено, что кружок рассеяния будет минимальным, если плоскость изображения смещена относительно плоскости Гаусса на величину  $\delta = 0,866\Delta S'_{\max}$ .

2.3. При выполнении п. 1.3. и определении формы линзы с минимальной сферической aberrацией необходимо перейти от задания линзы радиусами поверхностей к заданию углами нулевого луча  $\alpha$ . Изменяя угол  $\alpha_2$ , найти форму линзы с минимальной сферической aberrацией.

2.4. При выполнении п. 1.4. необходимо правильно для 2-й линзы: положение предмета и переднюю апертуру. Положение изображения после 1-й линзы определяет передний отрезок 2-й линзы:  $S'_{F_1} = S_2$ . Задняя апертура

первой линзы равна:  $\sin \sigma'_1 \approx \frac{D}{2f'_1}$ , где  $D$  – диаметр входного зрачка склеенного объектива (первой линзы). Имеем:

$\sin \sigma'_1 = \sin \sigma_2$ . Определить по формуле суммирования aberrации в плоскости изображения объектива:

$$\Delta S' = \Delta S'_1 \beta_2 + \Delta S'_2, S'_{F'} - S'_{c'} = (S'_{F'} - S'_{c'})_1 \beta_2 - (S'_{F'} - S'_{c'})_2. \quad (4.5.)$$

### Содержание отчета

1. Дать конструктивные параметры, чертежи склеенного объектива и линз, параксиальные характеристики.

2. Привести таблицы и графики aberrаций склеенного объектива и линз.

3. Выполнить расчет диаметров кружков рассеяния, ПНУ, формы линзы с минимальной сферической aberrацией и определить диаметр кружка рассеяния объектива с концентрацией энергии около 80%.

## Литература

1. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.А. Теория оптических систем., М.: Машиностроение, 1992.
2. Запрягаева Л.А., Свешникова И.С. Расчет и проектирование оптических систем. Учебник для ВУЗов. М.: Логос, 2000.
3. Прикладная оптика. М.И. Апенко, А.С. Дубовик, Г.В. Дурейко и др. Под ред. А.С. Дубовика. М.: Недра, 1982.
4. Н.К. Артюхина, А.А. Марчик. Компьютерное проектирование оптических систем в вычислительной оптике. Учебно-методическое пособие. Мн., БНТУ, 2005г.
5. Каталог оптических материалов.
6. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Изд. 3-е / Под ред. В.А.Панова. – Л. Машиностроение, 1980.
7. Н.К. Артюхина. Теория и расчет оптических систем. Ч.1. Учебное пособие для студентов приборостроительных ВУЗов РБ. Мн., БНТУ 2004г.

## Исходные варианты для расчета

Таблица 4.1.Примеры исходных вариантов для расчета

Вариант	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$d_1$	$d_2$	Марка стекла 1-ой линзы	Марка стекла 2-ой линзы	Диафрагменное число k
1	117.76	-85.11	-358.09	10.0	4.0	К8	Ф2	6
2	108.34	55.28	-364.42	3.0	9.0	ТФ1	К8	6
3	307,6	-165,99	-1548,0	8,0	6,0	ТК2	Ф2	5
5	60,61	-46,98	-126,2	5,0	3,5	К14	ТФ3	5
6	60,62	-44,33	-137,77	8,5	3,2	К8	ТФ1	8
7	36,31	-24,16	-80,54	4,0	1,5	ТК2	Ф2	6

## Лабораторная работа № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ АБЕРРАЦИЙ ВНЕОСЕВОЙ ТОЧКИ ДЛЯ ОБЪЕКТИВА И ЛИНЗ

**Цель работы:** закрепление теоретического материала лекций; приобретение практики в определении aberrаций внеосевой точки для узкого и широкого пучка лучей; приблизительное определение диаметра кружка рассеяния; изучение влияния формы линзы и положения входного зрачка на величину комы.

**Оборудование:** ПЭВМ, ППП «OPAL», электронный ключ защиты.

### Краткая теория

Лучи меридионального пучка (главный луч и лучи с относительными координатами  $m = 1,0$  и  $m = -1,0$ ) имеют поперечные aberrации, определяемые формулой

$$\Delta y' = y' - y'_{\text{гл.}}, \text{ тогда } \Delta y'_{+m} = y'_{m=1,0} - y'_{\text{гл.}} \text{ и } \Delta y'_{-m} = y'_{m=-1,0} - y'_{\text{гл.}}.$$

Монохроматические aberrации внеосевой точки можно разделить на две группы:

aberrации *узкого* пучка лучей (астигматизм, кривизна изображения, дисторсия);

aberrации *широкого* пучка лучей (aberrации в меридиональном и сагиттальном сечениях).

*Астигматизм* – разность:  $Z'_m - Z'_s$  (лучи, идущие из внеосевой точки и бесконечно близкие к главному, пересекаются в пространстве изображений на главном луче в разных точках в M и S плоскостях). В плоскости, проходящей через точку  $B'_s$ , изображением точки  $B$  будет линия, параллельная оси  $Y$ . Между плоскостями, проходящими через точки  $B'_m$  и  $B'_s$  расположена плоскость, в которой изображение точки  $B$  будет иметь форму круга (наилучшее изображение). Для различных внеосевых точек предмета точки наилучшего изображения лежат на неплоской поверхности. Эта aberrация носит название *кривизны изображения*, ее величина равна  $\frac{Z'_m + Z'_s}{2}$ .

*Дисторсия* заключается в том, что нарушается одно из основных положений теории ИОС: линейное увеличение в паре сопряженных и перпендикулярных оптической оси плоскостей есть величина постоянная. Если линейное увеличение уменьшается по полю, то изображение квадрата будет напоминать бочку, в противном случае – подушку. Величина дисторсии равна:

$$\beta_{\text{гл.}} - \beta_0,$$

где  $\beta_0$  - линейное увеличение для параксиальной области, а  $\beta_{zl}$  - линейное увеличение для реальных лучей.

Поперечная aberrация широкого пучка  $\Delta y'$  содержит три составляющие:

- поперечную кому  $k = \frac{y'_{+m} + y'_{-m}}{2} - y'_{zl}$ ,

- поперечную меридиональную кривизну  $\Delta y'_{кр.} = Z'_m \cdot \text{tg} \sigma'$ , где  $\sigma'$  - угол, образованный лучом широкого пучка с оптической осью,

- поперечную полевою сферическую aberrацию  $\Delta y'_{сф.} = \Delta S'_{сф.} \cdot \text{tg} \sigma'$ , где  $\Delta S'_{сф.}$  - продольная полевая сферическая aberrация.

Из хроматических aberrаций в узком пучке лучей для внеосевой точки имеет место хроматизм увеличения.

Хроматизм увеличения равен:  $y'_{F'} - y'_{C'}$ , где  $y'_{F'}$  и  $y'_{C'}$  - размеры изображения для линий  $F'$  и  $C'$ .

## Практическая часть

### 1. Задание для работы

1.1. В соответствии с индивидуальным заданием определить для 2-х точек поля aberrации узкого пучка лучей объектива. Составить таблицу aberrаций и построить графики. Сравнить точечные диаграммы объектива с заданной апертурой и с апертурой, уменьшенной в несколько раз.

1.2. Определить aberrации широкого пучка лучей в меридиональном и сагиттальном сечениях (для 2-х точек зрачка). Составить таблицы, построить графики. Определить величину комы и приблизительные размеры пятна рассеяния. Сравнить размеры пятен рассеяния, найденные по значениям aberrаций и по ТД.

1.3. Определить кому первой линзы объектива. Изменяя прогиб линзы, найти форму линзы с исправленной комой. Исследовать влияние положения входного зрачка на кому.

### 2. Указания по выполнению работы

2.1. При изучении пятен рассеяния от астигматизма и кривизны изображения относительное отверстие объектива рекомендуется уменьшить в 5-10 раз.

2.2. Для нахождения формы линзы, свободной от комы, необходимо перейти к заданию линзы углами нулевого луча. Угол  $\alpha_2$  изменять до тех пор, пока кома не станет равной нулю для края отверстия.

2.3. Определить кому для трех положений зрачка относительно 1-й поверхности.

*Содержание отчёта*

1. Оптические характеристики и конструктивные параметры объектива.
2. Таблицы и графики аберраций склеенного объектива.
3. Результаты расчета комы объектива для 2-х точек зрачка. Провести анализ точечной диаграммы.
4. Конструктивные параметры и величину комы первой линзы (2 варианта) для трех положений зрачка.

Таблица 5.1. Примеры исходных вариантов

Вариант	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$d_1$	$d_2$	Марка стекла 1-ой линзы	Марка стекла 2-ой линзы	Диафрагмен- ное число k	$2\omega$	$S_p$
1	51,94	-20,51	-109,39	4,5	1,5	ТК2	Ф2	5	$5^\circ$	$-f'/2$
2	59,04	-42,33	-146,25	5,7	1,9	К8	ТФ1	5	$5,5^\circ$	$-f'/3$
3	45,5	25,47	-578,17	1,3	4,0	ТФ1	К8	4	$5,5^\circ$	$-f'/3$
4	216,63	48,87	-119,22	3,0	9,0	БФ12	КФ4	7	$5^\circ$	$-f'/2$
5	117,76	-85,11	-358,09	10,0	4,0	К8	Ф2	5	$4,5^\circ$	-50,0
6	108,34	55,28	-364,42	3,0	9,0	ТФ1	К8	7	$4,5^\circ$	-50,0
7	163,27	73,99	-830,90	2,5	7,0	БФ12	БК6	6	$4,5^\circ$	-30,0
8	208,18	-130,14	-2783,6	4,0	3,0	ТК2	Ф2	5	$4^\circ$	-30,0

## Лабораторная работа №6 СИНТЕЗ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Цель работы:** углубление теоретического материала и приобретение практических навыков определения обобщённых характеристик, принятых в ППП «Орал» и оптических характеристик для четырёх типов ОС.

**Оборудование:** ПЭВМ, ППП «ORAL», электронный ключ защиты.

### Краткая теория.

Таблица 6.1. Общая классификация ОС по расположению объекта и изображения

Условное обозначение класса	Наименование класса ОС
00	Телескопическая система
01	Фотообъектив
10	Микрообъектив
11	Проекционная система

- 1) тип 00 – предмет и изображение находятся в бесконечности;
- 2) тип 10 – предмет находится на конечном расстоянии, а изображение - в бесконечности;
- 3) тип 11 – предмет и изображение находятся на конечных расстояниях;
- 4) тип 01 – предмет находится в бесконечности, а изображение на конечном расстоянии.

Рассмотрим основные закономерности на примере типа 00.

**Телескопические системы** (тип 00) имеют две модификации: схема Галилея или схема Кеплера.

Система Кеплера состоит из двух положительных компонентов: объектива (тип 01) и окуляра (тип 10). В плоскости действительного промежуточного изображения установлена полевая диафрагма.

Основные оптические параметры: видимое увеличение  $\Gamma, \times$ ; угловое поле в пространстве предметов  $2\omega, ^\circ$ ; диаметр выходного зрачка  $D'_p, \text{мм}$ .

Видимое увеличение  $\Gamma$ :

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \omega'}{\operatorname{tg} \omega} = -\frac{f'_{об}}{f'_{ок}} = \frac{D_{\text{вх. зр.}}}{D'_{\text{вых. зр.}}} \quad (6.1)$$

Фокусные расстояния объектива и окуляра связаны уравнениями:

$$\begin{cases} d = f'_{об} + f'_{ок} \\ \Gamma = -\frac{f'_{об}}{f'_{ок}} \end{cases}, \quad (6.2)$$

где  $d$  – расстояние между задней главной плоскостью объектива и передней главной плоскостью окуляра. Радиусы отдельных плосковыпуклых линз рассчитываем по формуле:

$$r = f'(n - 1) \quad (6.3)$$

Толщина по оси определяется из условия конструктивно допустимого размера толщины по краю  $t$ .

Рекомендуются следующие соотношения по ОСТ–490–83:

- 1) для положительных линз:  $4d + 10t \geq D$  (диаметр линзы),
- 2) толщина по краю  $t$  должна быть не меньше  $0,05D$ ;
- 2) для отрицательных линз:  $12d + 3t$ , толщина по оси должна быть не меньше  $0,05D$ .

Представим систему Кеплера с конструктивными данными (окуляр и объектив выполнены в виде отдельных плосковыпуклых линз).

Таблица 6.2. Конструктивные параметры ОС

$r_1 = f'_{об} (n - 1)$	$d_1$	K8
$r_2 = \infty$	$d_2 = S'_{F'_{об}} - S_{F_{ок}}$	
$r_3 = \infty$	$d_3$	K8
$r_4 = -f'_{ок} (n - 1)$		

Закономерности построения ОС любых типов (табл. 6.1) могут быть получены аналогично.

## Порядок выполнения работы

1. В соответствии с индивидуальным заданием определить конструктивные параметры компонентов. Компоненты считать однолинзовыми с одной плоской поверхностью (материал линзы – стекло К8).
2. Определить для системы в целом и для каждого ее компонента оптические характеристики, а также обобщенные оптические характеристики, принятые в ППП «Орал».

## Содержание отчёта

1. Габаритный расчет оптической системы.
2. Оптическая схема системы с указанием положения предмета и изображения (компоненты представить их главными плоскостями).
3. Конструктивные параметры оптической системы.
4. Расчеты, выполненные по формулам идеальной ОС и результаты, полученные в ППП «Орал».

Таблица 1. Примеры исходных вариантов для расчета

№№ вариантов	Положение плоскости предмета	Положение плоскости изображения	Обобщенные характеристики					Расстояние между компонентами	Линейное увеличение 1-го компонента	Расстояние между пл-ми предмета и изображения 1-го компонента	Линейное увеличение 2-го компонента	Расстояние от посл. комп-та до изображения
			Увеличение	Передняя апертура	Задняя апертура	Величина предмета	Величина изображения					
			$\bar{V}_0$	$\bar{A}_0$	$\bar{A}_0'$	$\bar{Y}_0$	$\bar{Y}_0'$	$d$	$\beta_1$	$L$	$\beta_2$	
1	ближнее	дальнее		0.18		0.15		210.00	-40.00	190.00		
2	дальнее	дальнее	-3.50		2.50	3.00		112.50				
3	дальнее	ближнее	-500.00	4.00		1.30		100.00				30.00
4	ближнее	ближнее		0.20		0.10		207.00	-40.00	190.00	-10.00	

## Лабораторная работа № 7

### КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ КОЛЛИМИРУЮЩИХ СИСТЕМ

**Цель работы:** закрепление знаний теоретического материала и расчет оптической системы для коллимации лазерного излучения.

**Оборудование:** ПЭВМ, ППП «OPAL», электронный ключ защиты.

#### Краткая теория

В качестве коллимирующих лазерных систем используют наиболее простые двухкомпонентные телескопические системы Кеплера и Галилея. Форма этих компонентов задается из технологических соображений, а поверхности линз обычно сферические. При расчете основное внимание уделяют исправлению сферической аберрации. Кома устраняется лишь при наличии в системе дополнительных коррекционных параметров.

*Телескопические системы Галилея* считаются наиболее предпочтительными, т.к. в них нет действительного промежуточного изображения (исключена фокусировка лазерного излучения). Они короче схем Кеплера и обеспечивают более совершенную коррекцию сферической аберрации путем компенсации аберраций компонентов. Наиболее простая конструкция коллимирующей системы Галилея состоит из двух одиночных линз (рис.7.1), которые рассчитываются из условия минимума сферической аберрации.

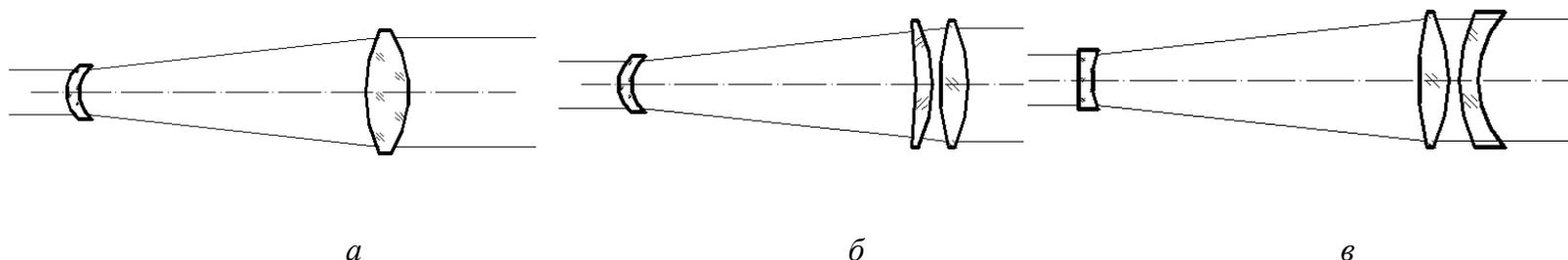


Рис. 7.1. Обратная телескопическая система Галилея

Положительную линзу рассчитывают на минимум сферической аберрации, ее «стеклянный» угол равен

$$\alpha_4 = -\frac{2n+1}{2(n+2)} \quad (7.1)$$

Величина угла  $\alpha_2$ , определяющего прогиб короткофокусной линзы, находится из уравнения  $S_1 = 0$  и равна

$$\alpha_2 = \frac{\sqrt{(4n-1)(\Gamma-1)} - 2n - 1}{2(n+2)}, \quad (7.2)$$

где  $\Gamma$  – увеличение телескопической системы.

Последующая коррекция, выполняемая за счет введения расфокусировки и изменения угла  $\alpha_2$ , обеспечивает двойную коррекцию сферической aberrации. Рассмотренная конструкция имеет сравнительно большие осевые размеры и небольшой диапазон увеличений (8...10 крат). С ростом увеличения прогиб отрицательной линзы сильно возрастает, и крайние апертурные лучи (на 2-й поверхности) претерпевают полное внутреннее отражение. В меньшей степени указанный недостаток проявляется в конструкциях систем с двухлинзовым компонентом, рассчитанным на минимум сферической aberrации (рис. 7.1, б).

Наиболее технологичная конструкция *лазерной коллимирующей системы Кеплера* – система с двухлинзовым объективом, рассчитанным на минимум сферической aberrации.

*Зеркальные и зеркально-линзовые коллимирующие системы* применяют в лазерных приборах, работающих в ИК диапазоне спектра. Использование чисто зеркальной оптики исключает проблему выбора материалов, прозрачных в ИК диапазоне, облегчает сборку и юстировку оптических систем, снижает стоимость. Основным их недостатком является экранирование.

Зеркальная система с малым центральным экранированием состоит из двух вогнутых и двух плоских зеркал с отверстиями в центральной части. При выполнении вогнутых зеркал сферическими ОС обладает неустрашимыми aberrациями (сферической aberrацией и комой). Осевые размеры  $l$  таких систем (расстояние между вогнутыми зеркалами) достаточно велики и определяются формулой

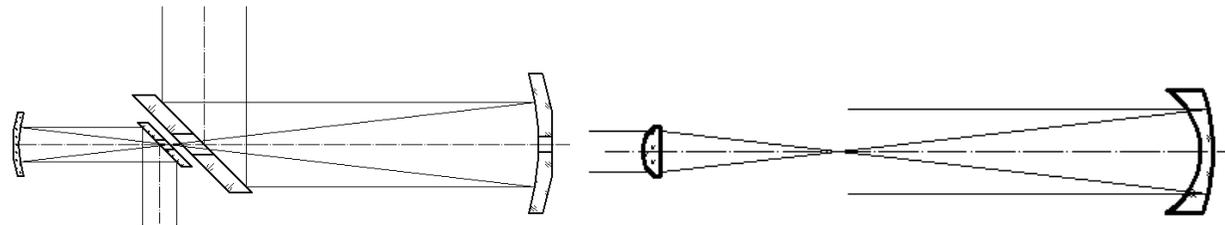


Рис. 7.2. Зеркальная коллимирующая система с малым центральным экранированием

Рис. 7.3. Схема коллимирующей системы с зеркалом Манжена

$$l = \frac{D(\Gamma - 1)}{4\Gamma} \sqrt[3]{\frac{\Gamma - 1}{2\Gamma\Psi}}, \quad (7.3)$$

где  $D$  – диаметр большого вогнутого стекла;  $\Psi$  - допустимая угловая aberrация.

В двухзеркальной системе Мерсенна с параболической формой поверхностей зеркал полностью исправлены сферическая aberrация, кома и астигматизм, но изготовление асферических зеркал малого диаметра (соизмеримого с размерами лазерных пучков) отечественной промышленностью не освоено.

Более технологична система, в которой малое вогнутое зеркало сферическое, а большое – гиперболическое. Эксцентриситет – коррекционный параметр сферической aberrации третьего порядка:

$$\varepsilon_{III} = \sqrt{\frac{\Gamma - 1}{\Gamma}}. \quad (7.4)$$

Для снижения стоимости изготовления асферическое зеркало заменяют *зеркалом Манжеса*. Если короткофокусная линза имеет сферические поверхности, ОС обладает единственным свободным параметром, поэтому в ней исправлена лишь одна aberrация, т.е.  $S_I = 0$ , а величина угла  $\alpha_5$ , определяющего форму зеркала Манжеса, находится из уравнения:

$$\alpha_5^3 - \frac{(n-1)(n+3)}{2n} \alpha_5^2 + \frac{(n-1)^2(4n+5)}{4n^2} \alpha_5 - \frac{(n-1)^2(4n^2-3)}{8n^3} + A = 0, \quad (7.5)$$

где величина  $A$  определяется конструкцией короткофокусного компонента:

1. для линзы наиболее благоприятной формы  $A = \frac{4n-1}{8(n+2)\Gamma}$ .
2. для линзы с одинаковыми радиусами  $A = \frac{4n^2(n-1)+2-n}{8n^2\Gamma}$ .
3. для двух одинаковых линз с равными радиусами,  $A = \frac{5(n+2)+4n^2(4n-5)}{32n^2\Gamma}$ .

Основным недостатком рассмотренных зеркальных и зеркально-линзовых коллимирующих систем является наличие полевых aberrаций.

## **Практическая часть**

### *Задание для работы*

1. Габаритный расчет телескопической системы.
2. Расчет конструктивных параметров ОС.
3. Исследование абберационных свойств компонентов.
4. Автоматическая оптимизация ОС.

### *Содержание отчета*

1. Краткая теория.
2. Расчетные формулы.
3. Исходные данные варианта.
4. Габаритный расчет и расчет конструктивных параметров.
5. Оптическая схема с указанием необходимых габаритов и параметров.
6. Распечатка необходимых значений остаточных aberrаций до и после оптимизации.

## **Литература**

1. Климков Ю.М. Прикладная лазерная оптика. – М.: Машиностроение, 1985, 124 с.
2. Русинов М.М. Композиция оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1989, 383 с.
3. Пахомов И.И., Цибуля А.Б. Расчет оптических систем лазерных приборов. – М.: Радио и связь, 1986, 152 с.
4. Маркузе Д. Оптические волноводы. Пер. с англ./Под ред. В.В. Шевченко. – М.: Мир, 1974, 576 с.
5. Вычислительная оптика: Справочник/М.М. Русинов, А.П. Грамматин, П.Д. Иванов и др.; Под общ. Ред. М.М. Русинова. – Л.: Машиностроение, 1984, 432 с.
6. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1969, 670 с.
7. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1975, 640 с.
8. Прикладная оптика / Под общ. Ред. А.С. Дубовика. – М.: Недра, 1982, 613 с.
9. Русинов М.М. Техническая оптика. – Л.: Машиностроение, 1979.
10. Квазиоптика: Сборник статей. Пер. с англ./ Под ред. Б.З. Каценеленбаума и В.В. Шевченко. – М.: Мир, 1966.

Таблица 7.1. Примеры вариантов заданий

Вариант	$\lambda$ , мкм	$2\omega$ , мин	$2\omega'$ , мин	$D_p$ , мм	$-S_p$ , мм	1:k	$d_1$ , мм	$d_2$ , мм	$n_1/n_3$
1	0.6328	10	1	5	10	1:3	3	5	ТФ1/К8
2	0.526	15	1	5	12	1:3	3	5	ТФ2/БК8
3	0.5397	12	0.8	6	15	1:4	3	5	Ф9/К8
4	0.488	10	0.8	6	12	1:5	3	5	Ф6/БК4
5	0.6943	10	1	4	10	1:3	3	5	ТФ2/БК10
6	0.4416	12	0.9	4	15	1;4	3	5	БФ11/К8

## Лабораторная работа №8

### КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ФОКУСИРУЮЩИХ СИСТЕМ

**Цель работы:** закрепление знаний теории и расчет ОС для фокусировки лазерного излучения.

**Оборудование:** ПЭВМ, ППП «OPAL», электронный ключ защиты.

**Краткая теория.** Применение одиночных линз со сферическими поверхностями ограничено из-за больших aberrаций, особенно в короткофокусных компонентах.

*Варианты решений.*

Первое решение. Применяют линзы, в которых одна из поверхностей асферическая. Расчет из условия исправления сферической aberrации, когда  $S_1 = \infty$ . Возможны две модификации: положительный мениск, у которого вогнутая поверхность обращена к плоскости фокусировки, а первая – деформирована и плосковыпуклая линза (рис. 8.1, 8.2).

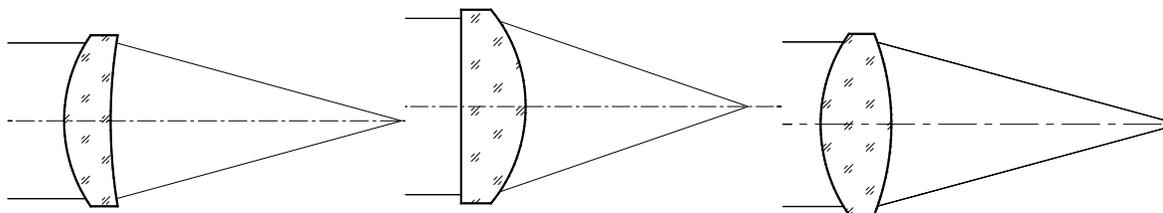


Рис.8. 1. Апланатическая линза с первой эллиптической поверхностью

Рис. 8.2. Апланатическая линза со второй гиперболической поверхностью

Рис. 8.3. Линза, обеспечивающая одновременное исправление сферической aberrации и комы

Радиус кривизны и эксцентриситет первой гиперболической поверхности в мениске:

$$r_1 = f' \frac{n-1}{n}; r_2 = f' - d; \quad \varepsilon_1 = \frac{1}{n}. \quad (8.1)$$

Радиус при вершине и эксцентриситет асферической поверхности плосковыпуклой линзы:

$$r_2^* = f'(1-n); \quad \varepsilon_2 = n. \quad (8.2)$$

В обеих линзах невозможно полное исправление полевых aberrаций, что существенно осложняет их согласование с лазером; необходимо обеспечивать высокоточную центровку их поверхностей.

Методика расчета линзы ( $S_I = S_{II} = 0$ ) для условий нормировки ( $\alpha_1 = 1, h_1 = h_2 = h = f'$ ):

1. величина угла  $\alpha_2$ , определяющего прогиб линзы, определяется из условия  $S_{II} = 0$ ;
2. эксцентриситет  $\varepsilon_1$  определяется из условия исправления сферической аберрации 3-го порядка

$$\alpha_2 = \frac{n}{n+1}, \quad \varepsilon_1 = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{n+1}{n}}. \quad (8.4)$$

Радиусы при вершинах бесконечно тонкой линзы вычисляются по формулам

$$r_1^* = f' \frac{n^2 - 1}{n^2}; r_2 = f' \frac{n^2 - 1}{n^2 - n - 1}. \quad (8.5)$$

В результате последующей коррекции (коррекционные параметры:  $\alpha_2, \varepsilon_1$  и  $\Delta$ ) достигается двойная коррекция сферической аберрации и однократная коррекция комы.

Второе решение. Условие минимума сферической аберрации 3-го порядка получается путем дифференцирования выражения для коэффициента Зейделя  $S_1$  по каждому из углов 1-го параксиального луча. Полученные производные приравнивают к нулю и сводят в систему уравнений, решая которую находят величины углов и все остальные конструктивные параметры системы. Согласно этой методике все линзы, входящие в компонент, положительные и обладают равными (если они изготовлены из одного материала) оптическими силами.

Величины внутренних углов, определяющих прогиб линз, вычисляются по формуле

$$\alpha_v = \frac{2n+1}{2+n} \cdot \frac{\alpha_{v-1} + \alpha_{v+1}}{2}, \quad (8.6)$$

где  $\alpha_{v-1}, \alpha$  и  $\alpha_{v+1}$  - углы 1-го параксиального луча.

*Пример:* компонент из двух линз из одного материала ( $S_1 = \infty; \alpha_1 = 0, \alpha_5 = 1$ ). Угол  $\alpha_3$  определяет соотношение оптических сил линз; углы  $\alpha_2$  и  $\alpha_4$  определяют их форму. Формулы расчета:

$$\alpha_2 = \frac{2n+1}{4(n+2)}; \alpha_3 = \frac{1}{2}; \alpha_4 = \frac{3(2n+1)}{4(n+2)}. \quad (8.7)$$

Третье решение. Компоненты с исправленной сферической aberrацией. Тонкий несклеенный компонент из 2-х линз (один материал) обладает тремя свободными коррекционными параметрами  $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ , не считая расфокусировки, возможно получить для трех апертурных лучей тройную коррекцию сферической aberrации. Возможны два варианта двухлинзовых компонентов с тройной коррекцией сферической aberrации, отличающихся расположением положительной и отрицательной линз.

### ***Практическая часть.***

Задание для работы

1. Габаритный расчет оптической системы фокусировки.
2. Расчет конструктивных параметров ОС.
3. Исследование aberrационных свойств компонентов.
4. Aberrационная коррекция на ЭВМ.
5. Автоматическая оптимизация ОС.

Содержание отчета

1. Краткая теория и расчетные формулы.
3. Исходные данные варианта.
4. Габаритный расчет и расчет конструктивных параметров.
5. Оптическая схема с указанием необходимых габаритов и параметров.
6. Распечатка необходимых значений остаточных aberrаций до и после оптимизации.

Таблица 8.1. Примеры вариантов заданий

№	$\lambda$ , мкм	$\delta$ , мм	$2\omega$ , мин	$D_p$ , мм	$-S_p$ , мм	$\dot{S}_3$ , мм	$D_2$ , мм	$D_4$ , мм	Марки стекол
1	0.6328	0.1	10	4	15	200	200	10	ТФ1/К8/К8
2	0.526	0.15	15	5	10	250	300	20	Ф2/БК10/БК4
3	0.5397	0.2	6	6	12	280	400	15	Ф9/К8/БК10
4	0.4416	0.3	18	6	15	350	300	14	БФ11/К8/БК4

## Требования к выполнению лабораторных работ

### Техника безопасности при работе с ПЭВМ

Перед началом работы:

1. Проверить надежность соединения клемм защитного заземления приборов с шиной заземления.
2. Проверить состояние изоляции кабелей, обеспечивающих функционирование ПЭВМ.
3. Убедиться, что все токоведущие части ПЭВМ закрыты

Во время работы:

4. Вынимать из разъемов или вставлять разъемные соединения только при отключенном от сети питании.
5. Не включать оборудование, работа на которых не предусмотрена заданием. Не оставлять без присмотра включенный ПЭВМ.

По окончании работы:

6. Отключать от сети ПЭВМ в порядке, обратном включению.
7. О неполадках, обнаруженных во время работы, сообщить преподавателю.

### Печать в системе «Opal»

1. Печать исходных данных производится из подменю главного меню «Файл» после нажатия кнопки «Печать». Печать осуществляется после расчета и после «выхода» из результатов расчета.
2. Печать результатов расчета:
  - войти в меню « Анализ аберраций»;
  - например, произвести расчет аберраций осевого пучка, нажав ENTER (на экране появятся результаты расчета);
  - нажать ESC, т.е. войти в основное меню;
  - нажать F7.
3. Команда на печать: послать задание – нажатие клавиши F7.

# КРАТКОЕ РУКОВОДСТВО ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ ППП ORAL

## 1. Центрированные системы с асферическими поверхностями

### Задание несферических поверхностей

При описании несферических поверхностей различают:

- несферические поверхности вращения второго порядка
- несферические поверхности вращения высшего порядка
- цилиндрические и торические поверхности с ориентацией по X и Y;
- конические поверхности.

Для описания деформации высшего порядка относительно базовой поверхности второго порядка может использоваться один из двух типов уравнений:

- тип U:  $P(U) = C(1) \cdot T^2 + C(2) \cdot T^3 + C(3) \cdot T^4 + \dots$ , где  $T = U/NA^2$ ,  $U = X^2 + Y^2$
- тип Z:  $P(Z) = CA(1) \cdot T^3 + CA(2) \cdot T^4 + \dots$ , где  $T = Z/NA$

Задается нормировочная высота в уравнении типа «U» (по умолчанию 1), либо нормировочная стрелка в уравнении типа «Z». Для асферики высшего порядка задают коэффициенты деформации (Рис. 1).

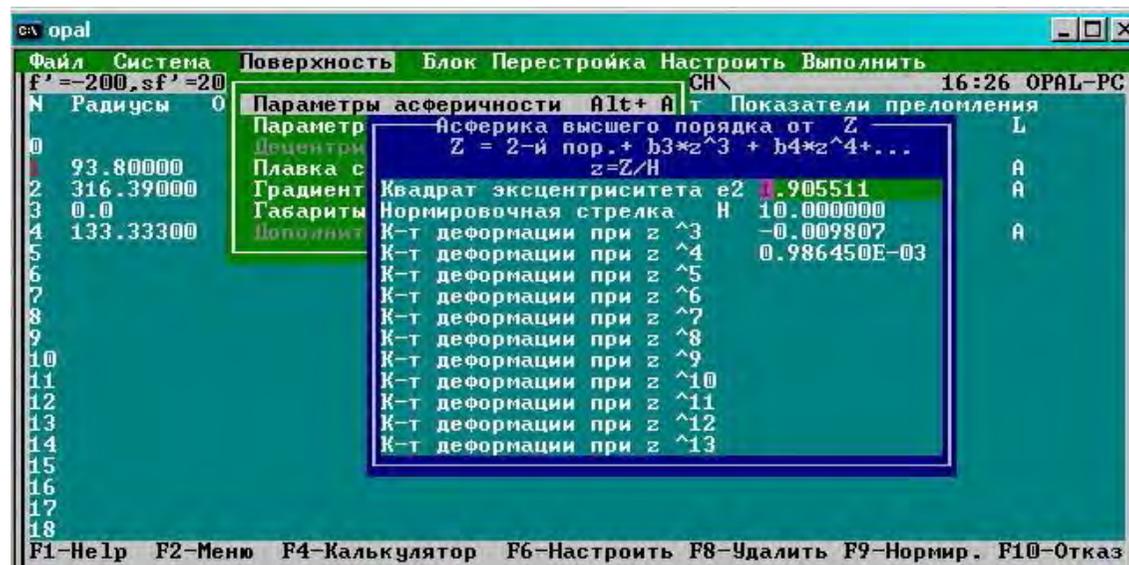


Рис. 1

Поверхностями вращения *второго порядка* являются поверхности, задаваемые уравнением  $Z-CR*(X^2+Y^2+(1-E2)*Z^2)/2=0$ .

Здесь CR – кривизна при вершине, E2 – квадрат эксцентриситета образующей (E2=0 для сферы, E2=1 для параболоида вращения,  $0 < E2 < 1$  для вытянутого эллипсоида вращения, E2>1 для гиперboloида вращения, E2<0 для сплюснутого эллипсоида вращения). Знак радиуса выбирается по ориентации рабочей части поверхности.

Например: E2=1 (поверхность– парабола; E2=12 (поверхность– гипербола).

Каждый коэффициент СА(К) уравнения показывает влияние соответствующего члена полинома на отклонение поверхности высшего порядка от базовой поверхности второго порядка в направлении нормали на расстоянии от оси равном нормировочной высоте НА для типа «U» и для точки, соответствующей стрелке прогиба «НА» для типа «Z». Величину НА полезно задавать близкой к половине светового диаметра этой поверхности для типа «U» и близкой к ее стрелке для типа «Z».

*Примечание:* для центрированных систем задание цилиндров и торов не допустимо. Коническая поверхность: для задания поверхности указывается угол раствора конуса.

## 2. Оптимизация

**Начало работы.** После ввода конструктивных данных ОС, описания пространства предметов, изображений, спектрального диапазона, расчета параксиальных и абберрационных характеристик можно приступить к процессу оптимизации оптической системы (Рис. 2).

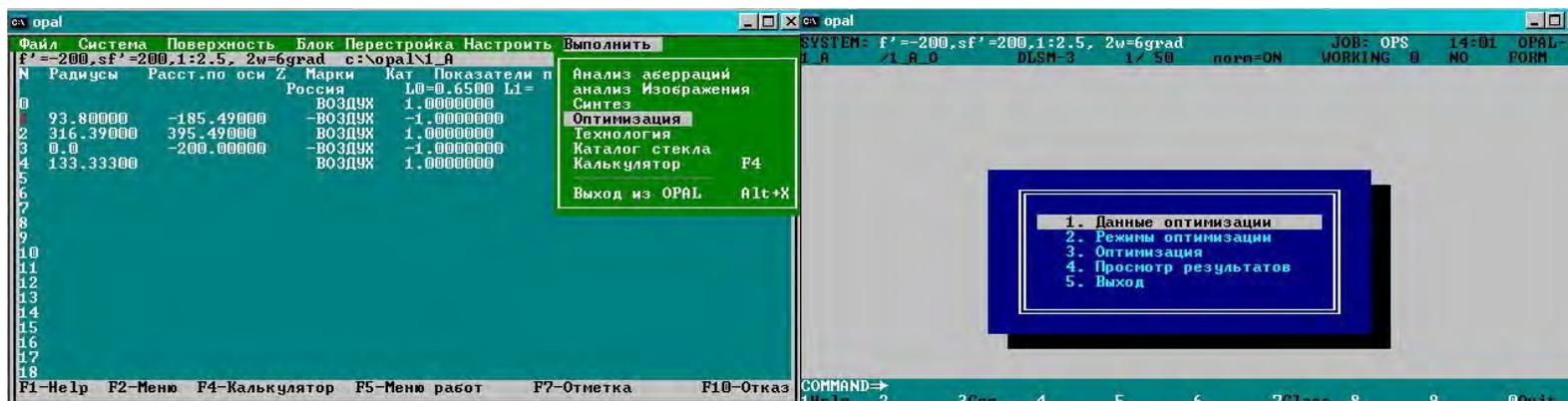


Рис. 2

Рис. 3

«Данные оптимизации» – позволяет вызвать из архива файл с данными (если такой имеется) или создать новый файл для запуска модуля оптимизации.

**Краткая сводка операторов описания исходных данных.** Исходный бланк данных для оптимизатора приведен на рис. 4.

Описание параметров оптимизации (*PAR*) представляется списком:

*PAR* (1-7) = *D, C, SI, SD, -D/1, CA/5, ES/5* или

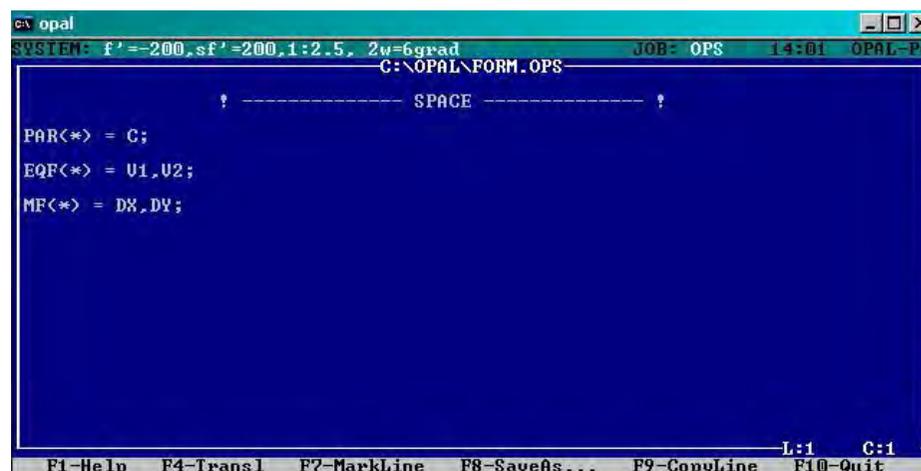
*PAR* (\*) = *D, C, SI, SD, -D/1, CA/5, ES/5*.

Связь между параметрами (*PARF, PARC, CC*) устанавливается операторами:

*PARF* (1-2) = *C/1-5, D/1-4*;

*PARC* (1-2) = *C/10-6, D/9-6*;

*CC* (1-2) = -1, 1.



The screenshot shows a window titled 'opal' with a blue background. At the top, system information is displayed: 'SYSTEM: f'=-200, sf'=200, i:2.5, 2w=6grad', 'JOB: OPS', '14:01', and 'OPAL-PC'. Below this, the file path 'C:\OPAL\FORM.OPS' is shown. A separator line with 'SPACE' in the center is visible. The main area contains the following parameter definitions:  
*PAR*(\*>) = *C*;  
*EQF*(\*>) = *U1, U2*;  
*MF*(\*>) = *DX, DY*;  
At the bottom right of the main area, 'L:1' and 'C:1' are displayed. A footer bar contains function key shortcuts: 'F1-Help', 'F4-Transl', 'F7-MarkLine', 'F8-SaveAs...', 'F9-CopyLine', and 'F10-Quit'.

Рис. 4

Ограничения на значения параметров: кривизны *C* <; *C* >; толщин *D* <; *D* >; переднего отрезка *SO* <; *SO* >; заднего отрезка или смещения *SI* <; *SI* >; положения диафрагмы *SD* <; *SD* > описывается границами (< – левой и > – правой).

Оптимизируемые (минимизируемые) функции представляются списком *MF*, (= *OF*).

В правой части указываются марки характеристик, а именно: *MF*(1-5) = *DYA, DYM, DYS, DXS*.

Список требуемых значений характеристик устанавливается оператором *MF#* или *MF#* (1-5) = 0. (по умолчанию за требуемые значения параксиальных характеристик принимаются исходные, а аберрации = 0).

Оператор списка весовых множителей –  $MFW$  или  $MFW(1-5) = 1$  – необязательный (по умолчанию значения равны 1). Список масштабных коэффициентов устанавливается оператором  $MFS (=OFS)$ . Необязательный оператор; значение по умолчанию зависит от характеристики, например, для продольных аберраций – 0,1 миллиметра (диоптрии), для поперечных аберраций 0,01 миллиметра (градуса).

*Ограничения – равенства* представляются списками:

- характеристик  $EQF$ :  $EQF(1-2) = VG0, SG'$ ;
- требуемых значений характеристик  $EQF\#$ :  $EQF\#(1-2) = -100., 98$ ;
- масштабных коэффициентов  $EQFS$ :  $EQFS(1-2) = 2.0, 0.1$ .

Два последних оператора являются необязательными:  $EQF\#$  – по умолчанию за требуемое значение характеристики принимается исходное,  $EQFS$  – значение по умолчанию зависит от типа характеристики.

*Ограничения - неравенства* представляются списками:

- характеристик  $INF$ :  $INF(1-3) = D, DE, AS$ ;
- граничных значений характеристик:  $INF <, INF >$  (для параметров граничные значения можно не указывать; минимальные значения толщин по краю указываются в списке  $DE <(1-...) = 0.1$ , максимально допустимые световые высоты – в списке  $AS >(1-...) = 15$ ); в которых индекс в скобках соответствует номеру поверхности);
- весовых коэффициентов для неравенств  $INFW$ :  $INFW(1-3) = 1.0$ ;
- допусков на выполнение граничных условий  $INFT$ :  $INFT(1-3) = 0.01$ ; необязательный оператор – значение зависит от типа характеристики.

*Количество лучей и относительные координаты пучков* описываются операторами:

- для осевого пучка:  $RAYA=2$ ;  $PCA(1-2) = 1., 0.707$ ;
- в половине меридионального сечения внеосевого пучка:  $RAYM=2$ ;  $PCM(1-2) = 1., 0.707$ ;
- в сагиттальном сечении внеосевого пучка:  $RAYS=2$ ;  $PCS(1-2) = 1., 0.707$ ;
- в косом сечении внеосевого пучка:  $RAYT=2$ ;  $PCT(1-2) = 1., 0.707$ ; азимут косого сечения в градусах  $SECT=45$ .

**Марки параметров, характеристик и аберраций.**

*Марки параметров* (тип/<номер поверхности, среды, промежутка>):

- кривизны  $C, C/3-5, C/5-3, C/3$ ;
- толщины  $D, D/3-5, D/5-3, D/3$ ;
- эксцентриситет  $ES/5$ ;
- коэффициенты асферики  $CA/5$ ;
- параметры ГОЭ:  $CHL/5$  (кривизна слева),  $CHR/5$  (кривизна справа);
- длина волны записи  $WLH/5$ ;
- коэффициенты высшего порядка  $CH/5$ ;
- передний отрезок  $SO$ ; задний отрезок  $SI$ ;

– положение диафрагмы  $SD$ .

Марки используются в списках: параметров оптимизации  $PAR$ ; свободных и связанных параметров  $PARF$ ,  $PARC$ ; ограничений-неравенств общего вида  $INF$ , если параметр контролируется методом штрафных функций.

*Марки параксиальных характеристик, продольных габаритов:*

- обобщенное увеличение в заданной плоскости  $V0$ ;
- обобщенное увеличение в плоскости Гаусса  $VG0$ ;
- положение плоскости предмета (для блока)  $SG$ ;
- положение плоскости Гаусса  $SG'$ ;
- смещение плоскости Гаусса относительно заданной  $DSG'$ ;
- положение входного зрачка  $SP0$ ; положение выходного зрачка  $SP0'$ ;
- сумма толщин  $L$ ;
- $LS'$ :  $L + SG' (L + SP0')$ ;  $LS$ :  $L - SG (L - SP0)$ ;  $LSS'$ :  $L - SG + SG'$ ;
- оптическая сила в диоптриях  $OP$ .

Марки используются в списках:  $MF$ ;  $INF$ ;  $EQF$ .

*Марки aberrаций (минимизируемые функции MF):*

*Осевого пучка:*

Продольные.....	$DSA, DSA/**$ $DSA/'*$ - первичный хроматизм $DSA/'**$ - вторичный хроматизм
Поперечные .....	$DYA, DYA/**$
Неизопланатизм.....	$DPA, DPA/*$
Астигматический отрезок...	$ZA, ZA/*$
<i>Главного луча:</i>	
Дисторсия абсолютная ....	$DIS, DIS/*, DIS/3$
Дисторсия % .....	$DIS\%, DIS\%/*, DIS\%/3$
Средняя кривизна .....	$FCM, FCM/*$
Астигматизм .....	$AST/*$
Астигматические отрезки .....	$ZM/*, ZS/*$
Аберрации в зрачках .....	$DSP/*, DSP/'*$
Хроматизм увеличения абсолютный...	$DVL, DVL/**, DVL/'*, DVL/'**$
Хроматизм увеличения относительный (%)	$DVL, DVL/**$

*Меридионального сечения внеосевых пучков:*

Поперечные .....

	$DYM/****$
--	------------

*Сагиттального сечения внеосевых пучков:*

Поперечные.....     *DYS,  DYS/\*\*\**  
                              *DXS,  DXS/\*\*\**

### **Сеанс работы.**

*Трансляция.* После вызова соответствующего модуля оптимизации появляется главное меню; производят трансляцию исходных данных оптимизации; запрашивается имя файла с данными. Если файл с указанным именем существует, то для трансляции автоматически загрузятся необходимые данные. Трансляция данных осуществляется нажатием клавиши <F4 >. В противном случае, для трансляции подставляется шаблон, который можно модифицировать с учетом данных оптической системы (рис. 9).

При наличии в тексте ошибок появятся соответствующие сообщения, после их исправления снова производят трансляцию. При успешной трансляции сообщений не выдается; отредактированное задание на оптимизацию сохраняют, нажав функциональную клавишу <F8>. Выход из транслятора производится с помощью клавиш <Esc> или <F10>. При выходе автоматически осуществляются операции по подготовке к процессу оптимизации, а также мультипликация марок, расчет и аппроксимация аберраций в исходной точке, вычисление штрафов и формирование выходных данных для просмотра.

*Процесс оптимизации* осуществляется согласно третьего пункта меню при условии, что режимы оптимизации удовлетворяют требованиям к ОС (их краткая сводка дана во второй информационной строке сверху). Для изменения режимов оптимизации используют второй пункт меню.

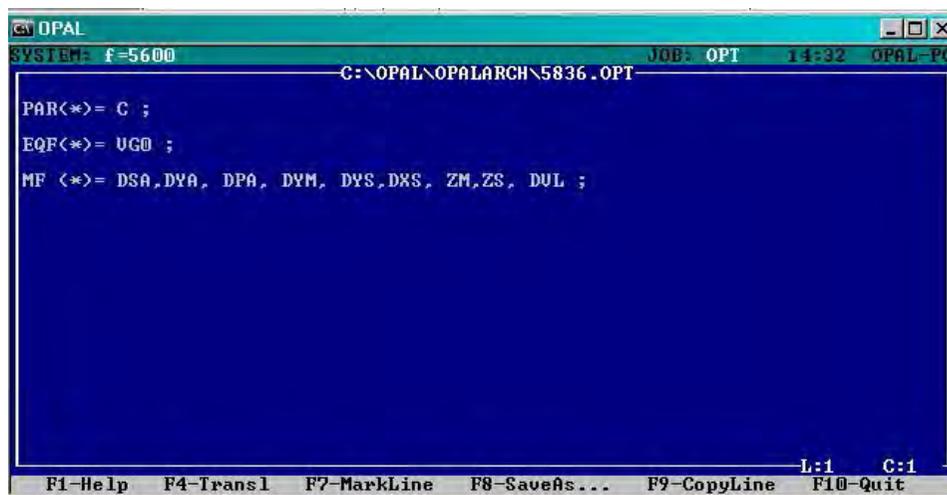


Рис. 5

При выборе третьего пункта меню на экране появятся таблицы, отображающие ход оптимизации по циклам, шагам и основным частям шага.

Просмотр хода оптимизации возможен в текстовом и графическом режимах. По умолчанию устанавливается текстовый режим, а для перехода в графический необходимо нажать клавишу <F6>.

В графическом режиме на экране отображаются:

- графики изменения критерия качества (зеленым цветом) и изменения штрафа (красным цветом) по шагам и циклам оптимизации;

- диаграмма распределения вкладов оптимизируемых функций в критерий качества коррекции (серым цветом показано распределение оптимизируемых функций на начало оптимизации, бежевым - распределение оптимизируемых функций на текущем шаге, в строке «Масштаб» соответствующими цветами показано соотношение максимальных вкладов на текущее состояние и на начало оптимизации);

- диаграмма распределения вкладов в штрафную функцию ограничений-неравенств, если она не нулевая;

- отображение (рисунок) оптической схемы.

Переход обратно в текстовый режим производится клавишей <F6>.

*Завершение оптимизации.* При необходимости завершить оптимизацию во время выполнения анализа влияния параметров следует нажать клавиши <Esc> или <F10>. После этого появится меню, которое будет содержать запрос о подтверждении окончания процесса. Если клавиша <Esc> была нажата случайно, то от завершения можно отказаться, выбрав соответствующий пункт меню.

## ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

### Примеры решения задач

#### Задача 1

Даны стекла К8, ТК16, Ф1, ТФ5. Вычислить хроматизм положения плоскопараллельной пластины толщиной  $d = 30$ мм.

Решение:

Марка стекла	К8	ТК16	Ф1	ТФ5
$n$	1,5183	1,6152	1,6169	1,7617
$\nu$	63,830	58,093	36,598	27,321

Хроматизм положения вычисляется по формуле:

$$\Delta s' = \frac{d(n-1)}{n^2\nu}$$

Тогда:

$$\Delta s'_{\text{К8}} = \frac{30(1,5183-1)}{1,5183^2 \cdot 63,830} = 0,1057; \Delta s'_{\text{ТК16}} = \frac{30(1,6152-1)}{1,6152^2 \cdot 58,093} = 0,1218$$

$$\Delta s'_{\text{Ф1}} = \frac{30(1,6169-1)}{1,6169^2 \cdot 36,598} = 0,1929; \Delta s'_{\text{ТФ5}} = \frac{30(1,7617-1)}{1,7617^2 \cdot 27,321} = 0,2695$$

#### Задача 2

Вычислить радиусы кривизны тонкой линзы и монохроматические aberrации III порядка с заданными значениями  $W = 0, f' = 100$ мм,  $a_p = 0, D/f' = 1/5, S = \infty, 2\omega = 12^\circ, n_2 = 1,5$ .

Решение:

$$D = f'/5 = 100/5 = 20\text{мм}, D = 2h_1 \Rightarrow h_1 = 10\text{мм}.$$

Условие нормировки:

$$\alpha_1 = 0, \alpha_3 = 1, h_1 = f' = 1, \beta_1 = 1, H_1 = a_p = 0.$$

Вычислим значение Р:

$$P = \left(\frac{n_2}{n_2 - 1}\right)^2 \left[1 - \left(2 + \frac{1}{n_2}\right)\alpha_2 + \left(1 + \frac{2}{n_2}\right)\alpha_2^2\right] \quad (1)$$

$$W = \frac{n_2}{n_2 - 1} \left(1 - \frac{n_2 + 1}{n_2}\alpha_2\right)$$

$$\alpha_2 = \frac{n_2}{n_2 + 1} - \frac{n_2 - 1}{n_2 + 1}W = \frac{n_2}{n_2 + 1} \quad (2)$$

После подстановки (2) в (1) и некоторых преобразований получим:  $P = \frac{n_2^3}{(n_2^2 - 1)^2}$

Инвариант Аббе:

$$n'\alpha' - n\alpha = h(n' - n)/r \quad (3)$$

$$n_2\alpha_2 - n_1\alpha_1 = h_1(n_2 - n_1)/r_1 \quad (4)$$

Из формул (3) и (4) выразим  $r_1:r_1 = \frac{h_1(n_2 - 1)}{n_2\alpha_2}$

Выразим  $r_2:n_3\alpha_3 - n_2\alpha_2 = h_1(n_3 - n_2)/r_2$ ;  $r_2 = \frac{h_1(-n_2 + 1)}{-n_2\alpha_2}$

Подставим в полученные формулы численные значения:

$\alpha_2 = 0,6^\circ$ ,  $W = 0$ ,  $P = 2,16$ ,  $r_1 = 55\text{мм}$ ,  $r_2 = -61,79\text{мм}$ .

Коэффициенты aberrаций вычисляются по формулам:  $S_I = \sum_{i=1}^{i=p} h_i(P_i + B_i)$ ;  $S_{II} = \sum_{i=1}^{i=p} y_i(P_i + B_i) - I \sum_{i=1}^p W_i$ ;

$$S_{III} = \sum_{i=1}^{i=p} \frac{y_i^2(P_i + B_i)}{h_i} - 2I \sum_{i=1}^p \frac{y_i W_i}{h_i} + I^2 \sum_{i=1}^p \Phi_i$$
;  $S_{IV} = \sum_{i=1}^{i=p} \Phi_i \pi_i$ ;

$$S_V = \sum_{i=1}^p \frac{y_i^3(P_i + B_i)}{h_i^2} - 3I \sum_{i=1}^p \frac{y_i^2 W_i}{h_i^2} + I^2 \sum_{i=1}^p \frac{y_i}{h_i} \Phi_i (3 + \pi_i).$$

Коэффициенты aberrаций:

$$S_I = P = 2,16$$
,  $S_{II} = 0$ ,  $S_{III} = 1$ ,  $S_{IV} = \pi$ ,  $S_V = 0$ .

Продольная сферическая aberrация:  $\delta s' = \frac{-m_1^2}{2f'} S_I = -0,0108 m_1^2$

Меридиональная Кома:  $\delta g' = \frac{-3}{2} \frac{m_1^2}{f'} t g \omega_1 S_{II} = 0$

$$\pi = \frac{\Phi}{n_2} = \frac{1}{0,1 \cdot 1,5} = 6,67$$

Кривизна изображения и астигматизм:  $z'_m = \frac{-1}{2} tg^2 \omega_1 f' [3S_{III} + S_{IV}] = 5,0846 \text{ мм}$

$$z'_s = \frac{-1}{2} tg \omega_1 f' [S_{III} + S_{IV}] = 4,03266 \text{ мм} \quad z'_s - z'_m = tg^2 \omega_1 f' S_{III} = 1,10469 \text{ мм}$$

Дисторсия:  $\delta y' = \frac{-1}{2} tg^3 \omega_1 f' S_V = 0.$

### Задача 3

Вычислить основные параметры двухлинзовой тонкой системы ( $n = 1,5$ )

Решение:

$$\alpha_0 = 0, \alpha_5 = 1, n_1 = n_3 = n_5 = 1, n_2 = n_4 = n = 1,5.$$

$$P_i = \sum_{s=1}^k P_s; P_s = \left( \frac{\frac{\alpha_s' - \alpha_s}{1 - \frac{1}{n_s}}}{\frac{1}{n_s'} - \frac{1}{n_s}} \right)^2 \left( \frac{\alpha_s'}{n_s'} - \frac{\alpha_s}{n_s} \right).$$

$$W_i = \sum_{s=1}^k W_s; W_s = \left( \frac{\frac{\alpha_s' - \alpha_s}{1 - \frac{1}{n_s}}}{\frac{1}{n_s'} - \frac{1}{n_s}} \right) \left( \frac{\alpha_s'}{n_s'} - \frac{\alpha_s}{n_s} \right).$$

Выполним расчет  $P_2^\infty$ :

$$P_2^\infty = \left( \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\frac{1}{n_2} - \frac{1}{n_1}} \right)^2 \left( \frac{\alpha_2}{n_2} - \frac{\alpha_1}{n_1} \right) + \left( \frac{\alpha_3 - \alpha_2}{\frac{1}{n_3} - \frac{1}{n_2}} \right)^2 \left( \frac{\alpha_3}{n_3} - \frac{\alpha_2}{n_2} \right) + \left( \frac{\alpha_4 - \alpha_3}{\frac{1}{n_4} - \frac{1}{n_3}} \right)^2 \left( \frac{\alpha_4}{n_4} - \frac{\alpha_3}{n_3} \right) + \left( \frac{\alpha_5 - \alpha_4}{\frac{1}{n_5} - \frac{1}{n_4}} \right)^2 \times \\ \times \left( \frac{\alpha_5}{n_5} - \frac{\alpha_4}{n_4} \right)$$

Преобразуем данное выражение и подставим известные величины. В результате получим:

$$P_2^\infty = 6[4(\alpha_4 - \alpha_2)\alpha_3^2 + 3,5(\alpha_2^2 - \alpha_4^2)\alpha_3 + 1,5(\alpha_4 - 1)^2].$$

Выполним расчет  $W_2^\infty$ :

$$W_2^\infty = \left( \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\frac{1}{n_2} - \frac{1}{n_1}} \right) \left( \frac{\alpha_2}{n_2} - \frac{\alpha_1}{n_1} \right) + \left( \frac{\alpha_3 - \alpha_2}{\frac{1}{n_3} - \frac{1}{n_2}} \right) \left( \frac{\alpha_3}{n_3} - \frac{\alpha_2}{n_2} \right) + \left( \frac{\alpha_4 - \alpha_3}{\frac{1}{n_4} - \frac{1}{n_3}} \right) \left( \frac{\alpha_4}{n_4} - \frac{\alpha_3}{n_3} \right) + \left( \frac{\alpha_5 - \alpha_4}{\frac{1}{n_5} - \frac{1}{n_4}} \right) \times \\ \times \left( \frac{\alpha_5}{n_5} - \frac{\alpha_4}{n_4} \right)$$

Преобразуем данное выражение и подставим известные величины. В результате получим:

$$W_2^\infty = 2[2,5(\alpha_3\alpha_4 - \alpha_2\alpha_3 - \alpha_4) + 1,5].$$

#### Задача 4

Вычислить монохроматические aberrации III порядка плоскопараллельной пластины при условии  $d = 20\text{мм}$ ,  $n = 1,5$ ,  $\sigma = 30^\circ$ ,  $2\omega = 12^\circ$ .

Решение:

Сферическая aberrация:

$$\Delta s_{III}' = 0,5(n^2 - 1)d\sigma^2/n^3 = 0,5(1,5^2 - 1) \cdot 20 \cdot (\sin 30^\circ)^2/1,5^3 = 0,926$$

Меридиональная Кома:

$$K_{III} = 1,5(n^2 - 1)d\sigma^2 \operatorname{tg} \omega/n^3 = 1,5(1,5^2 - 1) \cdot 20 \cdot (\sin 30^\circ)^2 \operatorname{tg} 6^\circ/1,5^3 = 0,292$$

Астигматизм:

$$z'_{m_{III}} = 1,5(n^2 - 1)d \operatorname{tg} \omega^2/n^3 = 1,5(1,5^2 - 1) \cdot 20 \cdot (\operatorname{tg} 6^\circ)^2/1,5^3 = 0,123$$

Кривизна поля изображения:

$$z'_{s_{III}} = 0,5(n^2 - 1)d \operatorname{tg} \omega^2/n^3 = 0,5(1,5^2 - 1) \cdot 20 \cdot (\operatorname{tg} 6^\circ)^2/1,5^3 = 0,041$$

Дисторсия:

$$\Delta y'_d = 0,5(n^2 - 1)d \operatorname{tg} \omega^3/n^3 = 0,5(1,5^2 - 1) \cdot 20 \cdot (\operatorname{tg} 6^\circ)^3/1,5^3 = 0,004$$

#### Задача 5

Вычислить aberrации III порядка вогнутого сферического зеркала  $R = -200\text{мм}$ ,  $S = -\infty$ ,  $D = 70\text{мм}$ ,  $2\omega = 5^\circ$ .

Решение:

$$\alpha_1 = 0$$

$$\alpha_2 = 1$$

$$f' = \frac{r_1}{2} = -\frac{200}{2} = -100\text{мм} \quad h_1 = f' = 1$$

Зная  $S_p = 0$ , получим  $y' = S_p = 0$

$$P_1 = -0,25 \cdot \alpha_2^3 = -0,25$$

$$W_1 = 0,5 \cdot \alpha_2^2 = 0,5$$

$$S_I^\infty = 0.25$$

$$S_{II}^\infty = -0.25 \cdot y_1 - 0.5 = -0.5$$

$$S_{III}^\infty = 0.25 \cdot y_1^2 + y_1 + 1 = 1$$

$$S_{IV}^\infty = -1$$

$$S_V^\infty = -0.25y_1^3 - \frac{3y_1^2}{2} - 2y_1 = 0$$

1. Сферическая aberrация ( $h_1 = m = f' = 1$ )

$$\Delta S_{III}^\infty = -0.5 \frac{m^2}{f'} S_I^\infty = -0.5 \cdot 0.25 = -0.125$$

2. Меридиональная кома:

$$K_{III}^\infty = 1.5 \frac{m^2}{f'} \cdot \text{tg} \omega \cdot S_{II}^\infty = 1.5 \cdot 0.04 \cdot (-0.5) = -0.03$$

3. Кривизна изображения:

$$z_{cp}^\infty = -0.5 f' \cdot \text{tg}^2 \omega \cdot (2S_{III}^\infty + S_{IV}^\infty) = -0.5 \cdot 1 \cdot 0.0016 \cdot (2 \cdot 1 - 1) = -0.0008$$

4. Астигматизм:

$$z_S'^\infty = -0.5 f' \cdot \text{tg}^2 \omega \cdot (S_{III}^\infty + S_{IV}^\infty) = 0$$

$$z_m'^\infty = 0.5 f' \cdot \text{tg}^2 \omega \cdot (3S_{III}^\infty + S_{IV}^\infty) = -0.51 \cdot 1 \cdot 0.0016 \cdot (3 - 1) = -0.0016$$

$$z_S'^\infty - z_m'^\infty = 0.0016$$

5. Дисторсия:

$$\Delta y_{III}' = -0.5 f' \cdot \text{tg}^3 \omega \cdot S_V^\infty = 0$$

### Индивидуальные вопросы для самостоятельной работы

1. Доказать, что мениск Максутава можно использовать как элемент, корректирующий сферическую aberrацию сферического зеркала.
2. Какие склейки более активно влияют на астигматизм? Привести пример.

3. Определить аналитически область граничных значений сферической аберрации плоской поверхности.
4. Вторичный спектр – способы устранения.
5. Определение аберрационных составляющих по графикам поперечных аберраций широкого наклонного пучка.
6. Сферическая аберрация плоской поверхности.
7. Суммирование аберраций от различных элементов оптической системы.
8. Получить формулу для хроматизма положения мениска с равными радиусами.
9. Хроматизм плоскопараллельной пластинки.
10. Получить формулу хроматизма положения для концентрической линзы.
11. Определить графически область существования положительных значений сферической аберрации в изображении бесконечно удаленной предметной точки, создаваемого сферической преломляющей поверхностью.
12. У какой линзы меньше хроматизм положения – у концентрической или простой? Пояснить.
13. Общая картина монохроматических аберраций оптической системы.
14. Что означает величина  $Z_t$  на графике поперечной аберрации в меридиональной плоскости?
15. Исправление комы в симметричных и пропорциональных системах.
16. Расчет лазерных фокусирующих зеркальных систем.
17. Расчет двухлинзового склеенного объектива по методике Слюсарева Г.Г.: описание основных параметров при заданной комбинации стекол.
18. Расчет двухлинзового склеенного объектива по методике Слюсарева Г.Г.: расчет конструктивных параметров (радиусов и толщины).
19. Компенсаторы Максудова Д.Д. и Шмидта – расчет параметров.
20. Комплексная оценка качества изображения, графики аберраций. Три составляющие кривой поперечной аберрации широкого внеосевого пучка в меридиональной плоскости.

## КУРСОВАЯ РАБОТА

### Цель и задачи курсового проектирования

Курсовая работа является одним из основных моментов при формировании квалифицированных специалистов и рассматривается как подготовительный этап к выполнению дипломного проекта.

*Цель курсовой работы* заключается в углублении и практическом освоении студентами знаний, полученных ими на лекционных и практических занятиях по дисциплине «Техническая оптика», в развитии у студентов навыков самостоятельной работы расчетного и конструкторского характера.

При выполнении работы от студентов требуется:

- умение пользоваться технической литературой, справочными материалами, нормами, каталогами, стандартами;
- знание основ методов расчета оптических схем, выбора источников и приемников излучения в том числе с использованием ПЭВМ;
- знание правил оформления конструкторской документации в соответствии ЕСКД.

### Содержание курсовой работы и требования к ее оформлению

Выполнение работы ведется в соответствии с техническим заданием (ТЗ) на курсовое проектирование.

Техническое задание составляется руководителем курсовой работы и должно включать:

- назначение и возможную область применения проектируемого оптического прибора;
- основные оптические характеристики прибора;
- условия эксплуатации прибора;
- основные габаритные размеры;
- параметры источников излучения;
- состав графической и расчетной частей проекта;
- перечень литературы, необходимой для предварительного изучения вопросов обоснования выбора оптической схемы, методики ее расчета.

Техническое задание может содержать базовую оптическую схему прибора с указанием необходимого моделирования и оптимизации. ТЗ оформляется на специальном бланке, подписывается руководителем работы и утверждается заведующим кафедрой. Студент расписывается в принятии ТЗ к исполнению.

Курсовая работа должна включать графическую часть объемом не менее трех листов формата А1 и расчетно-пояснительную записку.

В состав графической части входят:

- оптическая схема;
- чертежи оптических деталей;
- абберационный выпуск.

В зависимости от сложности и насыщенности оптическая схема прибора может выполняться на листах формата А1 и А2. Оптическая схема выполняется в соответствии с ГОСТ 2.412-81 в определенном масштабе. На схеме показываются все оптические детали прибора, источники освещения, приемники излучения (условными графическими обозначениями, установленными ЕСКД); положения диафрагм, фокальных плоскостей или плоскостей изображения предмета.

Номера позиций оптических деталей присваиваются по ходу луча. На оптической схеме также помещают:

- основные оптические характеристики прибора;
- таблицу с указанием  $r$ ,  $d$  и  $n$  для отдельных сборочных единиц оптической системы (объективов, конденсоров, коллективов и т.д.);
- наименование, шифр или тип источников освещения и приемников излучения;
- таблицу-перечень деталей, заполняемую по форме, принятой для спецификации;
- таблицу световых диаметров оптических деталей, соответствующих им стрелок прогиба и толщины по оси. Для призмы указывается длина развертки.

На оптической схеме показывают следующие размеры:

- диаметры диафрагмы, размеры зрачков; размеры тела накала и пр.;
- воздушные промежутки и другие размеры по оси, определяющие взаимное положение деталей, зрачков и диафрагм и др.;
- размеры, определяющие пределы перемещения или предельные углы поворота оптических деталей и некоторые другие размеры.

Оформление ПЗ производится обычно после выполнения чертежно-графической части проекта. Однако все необходимые материалы для текстовой части проекта следует собирать и фиксировать в течение всего периода работ над ним. Расчетно-пояснительная записка должна быть выполнена чисто и аккуратно на листах писчей белой нелинованной бумаги в переплете из плотной бумаги или картона в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32-81 «Отчет о научно-исследовательской работе. Общие требования и правила оформления».

Расчетно-пояснительная записка включает:

- титульный лист;

- задание на курсовое проектирование;
- содержание;
- вводная часть;
- описание оптической схемы;
- габаритный расчет оптической системы;
- абберационный расчет оптической системы;
- расчет неунифицированных элементов оптики в области аббераций III порядка;
- оценка геометрических аббераций элементов оптики и оптической системы в целом с помощью ПК;
- светоэнергетический расчет (расчет виньетирования и экранирования);
- список использованной литературы;
- приложение (в т.ч. ведомость оптических деталей).

Во введении должен быть приведен краткий обзор существующих оптических схем-аналогов, анализ исходных данных и основные предпосылки для габаритного расчета. При описании оптической схемы необходимо показать ход световых пучков, характер их преобразования, размеры изображения, особенности работы оптических элементов.

Расчетная часть проекта является основанием выбора каждого элемента оптической схемы. Перечень расчетов и их объем согласовывается с руководителем работы при выдаче задания.

Изложение ПЗ должно быть четким, по возможности кратким, но вместе с тем полностью раскрывающим существо рассматриваемых вопросов.

При выполнении записки необходимо пользоваться общепринятой терминологией, сокращениями и обозначениями, определяемыми соответствующими стандартами. Текстовая часть либо связывается с чертежно-графической частью проекта, либо сопровождается необходимыми по ходу изложения рисунками, схемами, графиками и т.д., на которые в тексте должна быть ссылка.

Все рисунки и схемы должны выполняться в соответствии с требованиями ЕСКД.

В списке использованной литературы указываются источники, которые были использованы при проектировании для выбора элементов оптической схемы, для выполнения расчетов и т.д. при этом в тексте расчетно-пояснительной записки в соответствующих местах приводятся ссылки на порядковый номер литературы в квадратных скобках. Общий объем расчетно-пояснительной записки 20–35 листов. Оформление ПЗ курсовой работы производится в соответствии с СП БНТУ 3.01 – 2003 «Курсовое проектирование» и МИ БНТУ 3.001 – 2003 «ЕСС БНТУ».

## Последовательность выполнения курсовой работы

Задание на курсовую работу студент получает на 1-й неделе (V курс) на аудиторном занятии, посвященном курсовому проектированию. В дальнейшем студенты должны являться на занятия, установленные расписанием и отчитываться за выполненную работу по курсовому проектированию в соответствии с приведенным ниже графиком. Учебным планом предусмотрено 16 часов аудиторных занятий. Внеаудиторная самостоятельная работа студента должна составлять примерно 30 часов.

Этапы	Неделя	Наименование этапов	Контрольные сроки
1	3	Анализ ТЗ. Аналитический обзор схем оптики.	Третья декада сентября
2	6	Выполнение габаритного расчета оптической схемы.	Вторая декада октября
3	9	Аберрационный расчет в области Зейделя.	Первая декада ноября
4	10	Аберрационный расчет неунифицированных оптических элементов.	Вторая декада ноября
5	11	Оценка аберраций оптической системы в программных средах по расчету оптики на ПЭВМ.	Третья декада ноября
6	12	Оптимизация оптической системы. Компьютерное моделирование.	Четвертая декада декабря
7	14	Выполнение чертежей. Оформление расчетно-пояснительной записки.	Первая декада декабря
8	16	Защита работы.	Вторая декада декабря

Разработка оптической схемы относится к опытно-конструкторской работе (ГОСТ 2.103-68). Габаритный оптический расчет является одним из определяющих в расчетной части проекта. Его обычно начинают с определения требуемых параметров объектива, в первую очередь фокусного расстояния  $f'$ , диаметра входного зрачка  $D$  и углового поля  $2\omega$ . Помимо объектива в схему прибора входят другие оптические элементы: окуляры, конденсоры, линзы, призмы и т.д. Расчет этих элементов может быть выполнен по материалам, изложенным в литературе [1, 2, 3]. Для выбора базовых элементов оптики на кафедре имеются каталоги соответствующих систем.

Методики проведения абберационных и светотехнических расчетов достаточно разнообразны и изложены, например, [4, 5, 6]. Методические указания по использованию ПЭВМ при расчетах оптических систем изложены в литературе [7].

Следует отметить, что на чертеже оптической схемы обязательному заполнению подлежит таблица «Перечень деталей». При этом необходимо графу «Обозначение» строить следующим образом:

- буквенная часть, представляющая собой аббревиатуру названия;
- двухзначные номера сборочных единиц;
- трехзначные номера деталей, входящих в сборочную единицу.

### **Оформление технической документации на рассчитанную оптическую систему**

**Требования к оформлению принципиальной оптической схемы.** Оформление технической документации на оптическую систему является завершающим этапом проектирования.

В техническую документацию входят: принципиальная оптическая схема, оптический выпуск на систему, таблицы влияния отклонения параметров на абберации и параксиальные характеристики, чертежи на оптические детали. Процесс оформления технической документации в настоящее время полностью автоматизирован.

Согласно ГОСТ 2.412-81 на оптической схеме должны быть изображены оптические элементы, выполняющие определенную функцию, упрощенно источники излучения, приемники лучистой энергии, если таковые есть в схеме; элементы, поворачивающиеся или перемещающиеся вдоль или перпендикулярно оси, которые следует показывать в основном рабочем положении; положение диафрагм, зрачков (при необходимости), фокальных плоскостей, плоскостей изображения, предмета (для фотографических объективов и объективов микроскопов), а также положение экранов, светорассеивающих плоскостей и поверхностей, если таковые есть в системе. На принципиальной оптической схеме необходимо привести основные оптические характеристики в виде записей на поле схемы или в таблице произвольной формы.

Кроме того, на оптических схемах следует указывать дополнительные сведения: расстояние от последней поверхности объектива до плоскости изображения в зависимости от расстояния до предмета; линейное перемещение окуляра на одну диоптрию; наименования или типы источников излучения и приемников лучистой энергии; световые диаметры и стрелки прогиба, толщины линз по оптической оси.

В зависимости от типа ОС на оптической схеме следует указывать: диаметры диафрагм, размеры зрачков, размеры тела накала или других светящихся элементов источников излучения, воздушные промежутки и другие размеры по оси, определяющие взаимное расположение оптических элементов, диафрагм, зрачков, фокальных плоскостей, плоскостей изображения и плоскостей предмета (для систем, работающих на конечном расстоянии), источников излучения и приемников энергии; размеры, определяющие положение оптической системы относительно механической части прибора; габаритные или установочные размеры, например, длину базы, высоту выноса плоскости изображения (при необходимости).

**Требования к оформлению аберационнового выпуска.** Для окончательного варианта системы после оптимизации с радиусами кривизны по ГОСТу составляется оптический выпуск, который содержит оптические характеристики, конструктивные параметры, таблицы и графики aberrаций.

В левой верхней части формата записывают название объектива, а затем указывают основные оптические характеристики, зависящие от расположения предмета и особенностей системы: фокусное расстояние или увеличение, относительное отверстие, апертуру или диаметр входного зрачка, угловое или линейное поле оптической системы в пространстве предметов. Для фотообъективов и проекционных объективов может быть указан размер кадра, предел разрешения, а иногда и коэффициент пропускания.

Для телескопических систем указываются увеличение, угловое поле, диаметр выходного зрачка, его расстояние от последней поверхности. Кроме того, могут быть указаны предел разрешения и коэффициент пропускания. Для фотоэлектрических систем следует указать тип приемника излучения и размер светового пятна на площадке приемника.

Для зеркальных и зеркально-линзовых систем рекомендуется помимо общих оптических характеристик указать коэффициент центрального экранирования и эффективное относительное отверстие. Для телеобъективов следует записать значение коэффициента телесокращения. Иногда приводятся дополнительные сведения, характеризующие особенность работы системы.

Ниже, под основными оптическими характеристиками, приводится основная длина волны, для которой исправлены монохроматические aberrации, а также интервал длин волн, в котором осуществлена ахроматизация системы.

Затем располагается чертеж оптической системы, выполненный в масштабе. Под чертежом приводятся конструктивные параметры системы ( $r$ ,  $d$ ,  $n$ ,  $\nu$ ), марки стекол или других оптических материалов, световые и

полные диаметры, а также стрелки прогиба поверхностей по световым и полным диаметрам. Если система содержит асферические поверхности, то соответствующие им вершинные радиусы записываются в виде  $r_{0v}$ , а ниже записывается уравнение профиля или поверхности. Под конструктивными параметрами системы указываются значения заднего фокусного расстояния, а также переднего и заднего фокальных отрезков.

Для случая предмета, расположенного на конечном расстоянии (в микрообъективах, проекционных, репродукционных объективах), приводится расстояние от первой оптической поверхности до предмета (передний отрезок) и от последней поверхности до изображения (задний отрезок), а также оптическая длина системы  $L$  – расстояние между плоскостями предмета и изображения.

Дополнительно могут указываться положение и размер апертурной диафрагмы в оптической системе, а также диаметры зрачков и расстояния от первой поверхности до входного зрачка ( $s_p$ ) и от последней поверхности до выходного зрачка ( $s'_p$ ). При необходимости – линейное увеличение в зрачках.

Числовые значения остаточных aberrаций оптической системы сводят в таблицы и строят соответствующие графики aberrаций. В правой верхней части приводится таблица aberrаций для точки на оси, где указаны сферическая aberrация, условие изопланатизма, сферохроматические разности и хроматизм положения.

Затем следует таблица aberrаций главных лучей и бесконечно тонких астigmatических пучков для различных точек поля: меридиональная и сагиттальная кривизна поверхности изображения, астigmatизм, дисторсия и хроматизм увеличения. В этой же таблице указывается удаление входного зрачка для оценки сферической aberrации в зрачках.

Далее следуют таблицы aberrаций лучей широких наклонных пучков в меридиональном и сагиттальном сечениях. Эти aberrации должны быть даны для различных точек поля для основной длины волны. Иногда указываются aberrации для дополнительных длин волн, подлежащих ахроматизации.

В отдельных случаях, например при больших относительных отверстиях и угловых полях зрения, приводится таблица aberrаций для внемеридиональных (косых) лучей.

Для высококачественных оптических систем, где качество изображения сравнимо с дифракционным, например объективов микроскопов, приводят таблицу волновых aberrаций и указывают положение плоскости наилучшей установки.

На основании данных таблиц строят соответствующие графики aberrаций. Графики поперечных aberrаций широких внеосевых пучков для различных точек поля необходимо выполнять в одинаковом масштабе.

Для объектива со сравнительно невысоким относительным отверстием сферическая aberrация, сферохроматические разности и условие изопланатизма рассчитывают для двух лучей: крайнего ( $m_{кр} = D/2$ ) и зонального (

$m_3 = m_{кр} / \sqrt{2}$ ). При высоких относительных отверстиях число лучей в осевом пучке увеличивают до трех-четырех ( $m_3 = m_{кр} / 2$ ;  $m_3 = m_{кр} / \sqrt{2}$ ;  $m_3 = (\sqrt{3}/2)m_{кр}$ ). График хроматизма положения обычно приводят для лучей на зоне  $m_3 = (m_{кр} / \sqrt{2})$ .

Аберрации главных лучей и наклонных пучков рассчитывают для двух или трех точек поля у объективов с угловым полем до  $60^\circ$  и для четырех или пяти точек поля для широкоугольных объективов.

Аберрации широких наклонных пучков определяют на основании расчета четырех и расчета четырех в меридиональном сечении и двух или трех лучей – в сагиттальном сечении. Для светосильных систем с высоким относительным отверстием число лучей в пучке увеличивается.

В некоторых оптических системах (в фотообъективах, телескопических системах и пр.) обычно допускаются виньетирование части наклонного пучка оправками линз или специальными виньетирующими диафрагмами. В этих случаях на оптических выпусках строятся диаграммы виньетирования, где следует указывать, какая поверхность или диафрагма вносит виньетирование. На графиках аберраций указываются зоны виньетирования. Для зеркальных и зеркально-линзовых систем рекомендуется на графиках аберраций указывать зоны центрального экранирования.

Коррекция аберраций ОС обычно выполняется для плоскости Гаусса. Однако плоскость наилучшей установки (ПНУ), в которой получается наиболее благоприятное распределение лучей в пятне рассеяния часто смещена относительно плоскости идеального изображения на графиках поперечных аберраций для разных наклонов, построенных в системе координат  $\Delta y'$  и  $100\Delta t g \sigma'$ , часто смещена относительно плоскости идеального изображения. Для определения этого смещения на графиках поперечных аберраций, построенных в системе координат  $\Delta y'$  и  $100\Delta t g \sigma'$ , через начало координат проводят прямую (секущую), отклонение которой от кривой поперечной аберрации является минимальным. В абберационном выпуске указывают величину смещения ПНУ относительно плоскости Гаусса.

### Порядок защиты работы

Оформленная курсовая работа подписывается студентом и руководителем и представляется к защите. Защита проводится перед комиссией, состоящей из двух преподавателей. Защита работы состоит из доклада продолжительностью 3–5 минут и ответов на вопросы членов комиссии.

Может быть рекомендован следующий примерный план построения доклада:

- название темы работы;
- назначение разрабатываемой оптической системы;

- исходные данные для проектирования;
- краткий обзор существующих аналогов;
- перечень выполненных расчетов с указанием их цели и результатов;
- пояснения конструктивных особенностей оптической системы;
- оценка и анализ качества изображения.

По окончании доклада и ответа на вопросы комиссия принимает решение об оценке курсовой работы.

### Рекомендуемая литература

1. Теория оптических систем. Ред. Русинов М.М. (Авт.: Бегунов Б.Н., Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И.) Изд. «Машиностроение», М., 1981, 432 с.
2. Чуриловский В.Н. Теория оптических приборов. Изд. «Машиностроение», М.-Л., 1966, 564 с.
3. Апенко М.И., Дубовик А.С. Прикладная оптика. Изд. «Наука», М., 1982, 352 с.
4. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. Изд. «Машиностроение», Л., 1975, 640 с.
5. Турыгин И.А. Прикладная оптика. Часть I. Геометрическая оптика и методы расчета оптических схем. Изд. «Машиностроение», М., 1965, 362 с. Часть II. Фотографические, проекционные и фотоэлектрические системы. Методы абберационного расчета оптических систем. Изд. «Машиностроение», 1966, 431 с.
6. Артюхина Н.К. Методические указания по использованию ЭВМ в курсовом проектировании по дисциплине «Теория оптических систем и техническая оптика», Минск, 1982.
7. Вычислительная оптика. Справочник. Ред. Русинов М.М. Изд. «Машиностроение», Л., 1984, 423 с.
8. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Ред. Панов В.А., «Машиностроение», Л., 1980, 742 с.
9. Артюхина Н.К. Теория и расчет оптических систем. Учебное пособие для студентов приборостроительных специальностей учреждений, обеспечивающих получение высшего образования. В 2ч.-Мн.:БНТУ, 2004, 134с.
10. СТП БНТУ 3.01-2003. Стандарт предприятия Курсовое проектирование.- Введ.14.01.03.-Мн., 2003.-15с.
11. МИ БНТУ 3.01-2003. Методическая инструкция БНТУ. Единая система стандартизации БНТУ. Дипломное проектирование. –Введ. 27.01.2004. – Мн.: БНТУ 2004.-41с.

# КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

## Средства диагностики

Оценка уровня знаний студента производится по десятибалльной шкале.

Для оценки достижений студента рекомендуется использовать следующий диагностический инструментарий:

- устный опрос во время практических занятий;
- защита выполненных на лабораторных занятиях индивидуальных заданий;
- защита выполненных в рамках управляемой самостоятельной работы индивидуальных заданий;
- защита курсового проекта;
- сдача экзамена.

## Критерии оценки результатов учебной деятельности

Баллы	Критерии оценки
<b>1 (один)</b>	Отсутствие приращения знаний и компетентности в рамках дисциплины; отказ от ответа
<b>2 (два)</b>	Фрагментарные знания в рамках дисциплины; знания отдельных литературных источников, рекомендованных учебной программой дисциплины; неумение использовать научную терминологию дисциплины, наличие в ответе грубых ошибок; пассивность на практических занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий
<b>3 (три)</b>	Недостаточно полный объем знаний в рамках дисциплины; знание части основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины; использование научной терминологии, изложение ответа на вопросы с существенными ошибками; слабое владение инструментарием учебной дисциплины, неумение ориентироваться в основных теориях, методах и направлениях дисциплины; пассивность на практических занятиях; низкий уровень культуры исполнения заданий
<b>4 (четыре)</b>	Достаточный объем знаний в рамках дисциплины; усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины; использование научной терминологии, логическое изложение ответа на вопросы, умение делать выводы без существенных ошибок; владение инструментарием учебной дисциплины, умение под руководством преподавателя решать стандартные ( типовые) задачи; умение ори-

	<p>ентироваться в основных теориях, методах и направлениях дисциплины и давать им оценку; работа под руководством преподавателя на практических занятиях, допустимый уровень культуры исполнения заданий</p>
<p><b>5 (пять)</b></p>	<p>Достаточные знания в объеме учебной программы; использование научной терминологии, грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать выводы; владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных задач; способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы; усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины; умение ориентироваться в теориях, методах и направлениях дисциплины и давать им сравнительную оценку; самостоятельная работа на практических занятиях, фрагментарное участие в групповых обсуждениях, достаточный уровень культуры исполнения заданий</p>
<p><b>6 (шесть)</b></p>	<p>Достаточно полные и систематизированные знания в объеме учебной программы; использование необходимой научной терминологии, грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обобщения и обоснованные выводы; владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных задач; способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы; усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины; умение ориентироваться в теориях, методах и направлениях дисциплины и давать им сравнительную оценку; самостоятельная работа на практических занятиях, периодическое участие в групповых обсуждениях, достаточно высокий уровень культуры исполнения заданий</p>
<p><b>7 (семь)</b></p>	<p>Систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы; использование научной терминологии, грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы и обобщения; владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в постановке и решении научных задач; свободное владение типовыми решениями в рамках учебной программы; усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины; умение ориентироваться в основных теориях, методах и направлениях дисциплины и давать им аналитическую оценку; активная самостоятельная работа на практических занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий</p>

<p><b>8</b> <b>(восемь)</b></p>	<p>Систематизированные, глубокие и полные знания по всем поставленным вопросам в объеме учебной программы; использование научной терминологии, грамотное и логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы и обобщения; владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в постановке и решении научных задач; способность самостоятельно решать сложные проблемы в рамках учебной программы; усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины; умение ориентироваться в теориях, методах и направлениях дисциплины и давать им аналитическую оценку; активная самостоятельная работа на практических занятиях, систематическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий</p>
<p><b>9</b> <b>(девять)</b></p>	<p>Систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы; точное использование научной терминологии, грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы; владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных задач; способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации в рамках учебной программы; полное усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины; умение ориентироваться в теориях, методах и направлениях дисциплины и давать им аналитическую оценку; систематическая активная самостоятельная работа на практических занятиях, творческое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий</p>
<p><b>10</b> <b>(десять)</b></p>	<p>Систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы, а также по основным вопросам, выходящим за ее пределы; точное использование научной терминологии, грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы; безупречное владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных задач; выраженная способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации; полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы по учебной дисциплине; умение свободно ориентироваться в теориях, методах и направлениях дисциплины и давать им аналитическую оценку, использовать научные достижения других дисциплин; самостоятельная творческая работа на практических занятиях, активное творческое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий</p>

## Контрольные задания по темам учебной дисциплины к зачету

### № 1

1. Доказать, что мениск Максудова можно использовать как элемент, корректирующий сферическую aberrацию сферического зеркала.
2. Нормальные и аномальные склейки.

### № 2

3. Базовые элементы оптических систем.
4. Какие склейки более активно влияют на астигматизм? Привести пример.

### № 3

1. Инвариант Штраубеля.
2. Определить аналитически область граничных значений сферической aberrации плоской поверхности.

### № 4

1. Получить формулу для оптической силы из « $n$ » концентрических поверхностей.
2. Анализ волновой сферической aberrации  $A_S''' = 0$ ,  $2A_T''' = C'''$ .

### № 5

1. Сферохроматическая aberrация.
2. Вторичный спектр – способы устранения.

### № 6

1. Волновые aberrации, их связь с геометрическими aberrациями.
2. Вывести формулу для « $M$ » оптической силы склеенной поверхности.

### № 7

1. Определение aberrационных составляющих по графикам поперечных aberrаций широкого наклонного пучка.
2. Сферическая aberrация плоской поверхности.

### № 8

1. Возможные сочетания коэффициентов астигматизма (волнового) (графики).
2. Суммирование aberrаций от различных элементов оптической системы.

### № 9

1. Связь узловых и главных фокусных расстояний.
2. Построить положения фокусов на главном луче

№ 10

1. Узловые фокусные расстояния сложной оптической системы.
2. Получить формулу для хроматизма положения мениска с равными радиусами

№ 11

1. Инвариант Лагранжа – Гельмгольца в сагиттальной плоскости.
2. Хроматизм плоскопараллельной пластинки.

№ 12

1. Для чего вводятся понятия узловых фокусных расстояний? Пояснить.
2. Условие Штебле-Лихотского.

№ 13

1. Угловое увеличение в « $M$ » и « $S$ » плоскостях.
2. Меридиональный инвариант Гульстранда-Юнга.

№ 14

1. Инвариант Лагранжа-Гельмгольца в меридиональной плоскости.
2. Получить формулу хроматизма положения для концентрической линзы.

№ 15

1. Сагиттальный инвариант Гульстранда - Юнга.
2. Определить графически область существования положительных значений сферической аберрации в изображении бесконечно удаленной предметной точки, создаваемого сферической преломляющей поверхностью.

№ 16

1. Какие склейки более активно влияют на астигматизм? Привести пример.
2. Графоаналитический метод построения апланатических поверхностей

№ 17

1. Телеанастигматы.
2. Ахроматический мениск. Связь конструктивных параметров. Основные свойства.

№ 18

1. Корригирование сферической продольной аберрации III порядка аберрациями высшего порядка.
2. Анализ астигматизма  $A'_s = 0$ ,  $A'_t \neq 0$ . Картина волновых и поперечных аберраций.

№ 19

1. Положение апланатических точек относительно центра сферической отражающей поверхности.
2. Инвариант Штраубеля.

№ 20

1. Условие синусов Аббе.
2. Положение апланатических точек относительно центра сферической преломляющей поверхности.

№ 21

1. У какой линзы меньше хроматизм положения – у концентрической или простой? Пояснить.
2. Вывести формулу для « $M$ » оптической силы склеенной поверхности.

№ 22

1. Сочетание сферической аберрации и астигматизма (при суммировании).
2. Линейное увеличение сложной оптической системы.

№ 23

1. Фокусное расстояние сложной оптической системы.
2. Общая картина монохроматических аберраций оптической системы.

№ 24

1. Связь волновых и геометрических аберраций (формулы в плоскости, перпендикулярной оптической оси; для телескопических систем).
2. Графики волновой аберрации при взаимокompенсации сферических аберраций III и V порядков.

№ 25

1. Связь волновых и геометрических аберраций (формула в плоскости, перпендикулярной главному лучу. Пояснить примером).
2. Роль расфокусировки, как сферической аберрации I порядка, при компенсации сферической аберрации III порядка.

№ 26

1. Биапланатические линзы.
2. Анализ сферической аберрации при коэффициентах  $C''' = 0, A_t''' = A_s''' \neq 0$ .

№ 27

1. Определение меридиональной сферической аберрации по графику поперечной аберрации широкого внеосевого пучка в меридиональном сечении.
2. Анализ комы  $A'' \neq 0, C'' = 0$ . Графики.

№ 28

1. Понятие главных фокусных расстояний. Формула Ньютона.
2. Определение меридиональной кривизны по графику поперечной аберрации широкого наклонного пучка в «М» сечении.

№ 29

1. Каким образом нужно компоновать совокупность концентрических систем? Показать графически.
2. Картины волновых и поперечных аберраций в случае, когда коэффициенты астигматизма  $A'_t = 0$ ,  $A'_s \neq 0$ .

№ 30

1. Получить формулу сферической аберрации для изображения бесконечно удаленной предметной точки, создаваемого сферической отражающей поверхностью.
2. Графики монохроматических геометрических аберраций ОС.

№ 31

1. Понятие склейки с прямой и обратной ориентировкой.
2. Экстремальные значения волновой сферической аберрации. Методы определения.

№ 32

1. Что означает величина  $Z_t$  на графике поперечной аберрации в меридиональной плоскости?
2. Получить формулу для  $\Phi$  из «n» концентрических поверхностей.

№ 33

1. Анализ волновой и поперечной аберрации астигматизма  $A'_t = A'_s$ . Картины рассеяния.
2. Вывести формулу для «S» оптической силы склеенной поверхности ( $\Phi_S$ ).

№ 34

1. Коррекционно-силовые компоненты оптических систем.
2. Анализ комы  $A'' \neq 0$ ,  $C''' = 0$ . Графики.

№ 35

1. Сочетание комы и астигматизма при малых апертурных углах.
2. Получить условие исправления хроматизма увеличения в телеконцентрической системе.

№ 36

1. Разложение волновой аберрации. Составляющие.
2. Формула сферической аберрации склеенной поверхности.

№ 37

1. Понятие волновой аберрации.
2. Коррекционно-силовые компоненты оптических систем.

№ 38

1. Возможные сочетания коэффициентов волновой комы (графики).
2. Получить формулу сферической аберрации III порядка в изображении бесконечно удаленной предметной точки, создаваемого сферической преломляющей поверхностью.

№ 39

1. Исправление комы в симметричных и пропорциональных системах.
2. Определение аберрационных составляющих по графикам поперечных аберраций широкого наклонного пучка.

№ 40

1. Склейки с прямой и обратной ориентировкой.
2. Условие анастигматичности.

**Вопросы к экзамену по дисциплине**

1. Автоматизированное проектирование ОС (цель, задачи).
2. Этапы разработки ОС.
3. Автоматизированные программы по расчету ОС.
4. Синтез, анализ, оптимизация, САПР.
5. Технические средства автоматизированного проектирования ОС (АПОС).
6. Математические модели и уровни автоматизированного проектирования оптических систем.
7. Основные направления развития АПОС.
8. Методы аберрационного расчета (метод проб, алгебраический метод).
9. Методы аберрационного расчета (комбинированный метод, метод автоматической оптимизации, композиционный метод).
10. Основные формулы монохроматических аберраций III порядка (зависимость поперечных аберраций от сумм Зейделя). Практическое применение формул Зейделя для решения задач.
11. Методы расчета лазерных оптических систем.
12. Коэффициенты монохроматических аберраций оптических поверхностей с деформациями (НП).

13. Базовые элементы ОС.
14. Коррекционно-силовые элементы ОС.
15. Концентрическая линза. Мениск Максудова.
16. Склеенная поверхность. Ориентировка склеенной поверхности. Нормальные и аномальные склейки. Астигматизм склеенной поверхности.
17. Расчет двухлинзового склеенного объектива по методике Слюсарева Г.Г.: описание основных параметров при заданной комбинации стекол.
18. Расчет двухлинзового склеенного объектива по методике Слюсарева Г.Г.: расчет конструктивных параметров (радиусов и толщины).
19. Светосильные объективы типа «Плазмат», «Гелиос», Петцваля.
20. Двойные склеенные и четырехлинзовые анастигматы.
21. Широкоугольные объективы «Руссар», «Лиар».
22. Зеркально-линзовые объективы Максудова Д. и Шмидта.
23. Оптические характеристики оптических материалов для ИК-области спектра.
24. Оптические характеристики бесцветных стекол. Апохроматы.
25. Композиция и расчет оптики микроскопов.
26. Комплексная оценка качества изображения, графики aberrаций. Три составляющие кривой поперечной aberrации широкого внеосевого пучка в меридиональной плоскости.
27. Композиция растровых систем.
28. Расчет линзы Френеля.
29. Градиентная оптика. Примеры.
30. Нетрадиционные оптические элементы: аксиконы, киноформы.

## Примерный перечень контрольных вопросов к лабораторным работам

### *Лабораторная работа №1*

1. Передний отрезок: а)  $OB=1$ ; б)  $OB=0$ .
2. Параметры изображения: а)  $OB=1$ ; б)  $OB=0$ .
3. Варианты задания плоскости изображения в оптической системе.
4. Задание массива радиусов и осевых расстояний.
5. Использование машинного каталога оптических сред.
6. Понятие обобщенного увеличения.
7. Расчет фокусного расстояния в двухкомпонентной системе.
8. Расчет положения изображения в двухкомпонентной системе (каскадное построение).
9. Конструктивные параметры линз и склеек.
10. Кардинальные элементы линз и склеек.
11. Режим «Масштабирование».
12. Режим «Обернуть» и «Вставить поверхность».

### *Лабораторная работа №2*

1. Аберрации III порядка.
2. Аберрации I порядка.
3. Связь геометрических и волновых аберраций.
4. Оценка меридиональных составляющих по графику поперечной аберрации широкого внеосевого пучка.
5. Точечная диаграмма.
6. Уменьшение кружка рассеяния с помощью выбора плоскости установки.
7. Коррекционные параметры, влияющие на сферическую аберрацию.
8. Граничные значения сферической аберрации.
9. Склеенный объектив: а) исправление аберраций, б) назначение, в) оптические характеристики.
10. Влияние склеенной поверхности на сферическую аберрацию.

### *Лабораторная работа №3*

1. Назначение зеркальных систем.
2. Линзовые компенсаторы к зеркальным системам.
3. Виды асферических поверхностей лртических систем.
4. Расчет зеркальных систем в области аббераций 3-го порядка.
5. Уравнения асферических зеркальных систем.
6. Коррекционные параметры зеркальных систем.
7. Разложение аббераций 3-го порядка ОС с несферическими поверхностями.
8. Задание асферики в ППП «ОПАЛ».
9. Меридиональный и сагиттальный радиусы кривизны.
10. Инварианты Гульстранда-Юнга.
11. Квадрат эксцентриситета кривых 2-го порядка.
12. Коррекционные параметры зеркальных систем с асферикой.

### *Лабораторная работа №4*

1. Сферическая абберация. Понятие, графики.
2. Расчет неизопланатизма. Формула связи с комой.
3. Выбор плоскости наилучшей установки (ПНУ).
4. Понятие и формула волновой сферической абберации.
5. Графики хроматических аббераций осевой точки.
6. Сферохроматическая абберация.
7. Расчет линз с минимальной сферической абберацией.
8. Влияние формы (прогиба) линз на сферическую абберацию.
9. Ахроматические оптические системы.
10. Апланатические точки и поверхности.

### *Лабораторная работа №5*

1. Абберации узкого пучка.
2. Понятие меридиональной и саггитальной плоскостей.
3. Кома: описание, графики, расчет.
4. Астигматизм и кривизна изображения.

5. Аберрации широкого внеосевого пучка.
6. Понятие главного луча.
7. Наборы лучей для расчета аберраций.
8. Примеры оформления графиков аберраций узкого наклонного пучка.
9. Примеры оформления графиков аберраций широкого меридионального пучка.
10. Примеры оформления графиков аберраций широкого саггитального пучка.

### *Лабораторная работа №6*

1. Передний отрезок: а)  $OB=1$ ; б)  $OB=0$ .
2. Параметры изображения: а)  $OB=1$ ; б)  $OB=0$ .
3. Варианты задания плоскости изображения в оптической системе.
4. Задание массива радиусов и осевых расстояний.
5. Использование машинного каталога оптических сред.
6. Понятие обобщенного увеличения.
7. Расчет фокусного расстояния в двухкомпонентной системе.
8. Расчет положения изображения в 2-х компонентной ОС (каскадное построение; через главные плоскости).
9. Конструктивные параметры линз и склеек.
10. Кардинальные элементы линз и склеек.
11. Режим «Масштабирование».
12. Режим «Обернуть» и «Вставить поверхность».

### *Лабораторная работа №7*

1. Назначение коллимирующих систем.
2. Коррекционные параметры систем коллимации.
3. Типы коллимирующих систем.
4. Варианты построения линзовых систем для коллимации лазерного излучения.
5. Композиции зеркальных коллимирующих систем.
6. Линзовые системы Галлилея. Пример расчета.
7. Линзовые системы Кеплера. Пример расчета.
8. Схема коллимирующей ОС с компонентами, рассчитанными на « $\min$ » сферической аберрации.
9. Схема, обеспечивающая тройную коррекцию сферической аберрации. Формулы расчета.

10. Схема коллимации, в которой объектив обеспечивает двойную коррекцию сферической aberrации и коррекцию комы. Методика расчета.
11. Схема с двухлинзовыми короткофокусными компонентами. Основные параметры компонентов.
12. Зеркально-линзовая коллимация. Система с зеркалом Манжена.

### *Лабораторная работа №8*

1. Применение лазерных фокусирующих систем.
2. Типы лазерных фокусирующих систем.
3. Методика расчета линзовых систем, рассчитанных на минимум сферической aberrации.
4. Однолинзовый компонент. Типы. Исправление aberrаций.
5. Уменьшение остаточных aberrаций за счет перефокусировки.
6. Компоненты с исправленной сферической aberrацией: 1-я линза – а) положительная; б) отрицательная.
7. Двухлинзовые компоненты с исправленной комой: 1-я линза – а) положительная; б) отрицательная.
8. Двойная коррекция сферической aberrации и однократная кома.
9. Габаритный расчет фокусирующих лазерных систем
10. Комбинации материалов, применяемых в лазерных фокусирующих системах

## ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

### ВЫДЕРЖКИ ИЗ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ ДИСЦИПЛИНЫ

Согласно типовым учебным планам на изучение дисциплины «Техническая оптика» отведено максимально 300 ч., в том числе 112 ч. аудиторных занятий, из них лекции – 64 ч., практические занятия (курсовое проектирование) – 16 ч., лабораторные работы – 32 ч.

#### Примерный тематический план

Наименование раздела и темы	Лекции (часы)	Лабораторные занятия (часы)	Всего аудиторных часов
<b>Раздел I. Анализ оптических систем</b>			
Тема 1. Монохроматические aberrации, фигуры рассеяния и графики aberrаций	6		10
Тема 2. Хроматизм и оптические характеристики стекол	6		12
Тема 3. Абберационные полиномы	4		8
Тема 4. Методы коррекции aberrаций	4	8	14
Тема 5. Компьютерные программы анализа	4	4	12
Тема 6. Оценка качества изображения оптических систем	4	8	8
<b>Раздел II. Синтез оптических систем</b>			
Тема 7. Теория коллиениарности и оптика Гаусса вдоль главного луча	2		2
Тема 8. Базовые (силовые) элементы	6	4	16
Тема 9. Коррекционные элементы	4		8
Тема 10. Компьютерные программы синтеза	4	4	10
<b>Раздел III. Композиция ОС различного назначения</b>			
Тема 11. Светосильные объективы	4	2	8
Тема 12. Широкоугольные объективы	2	2	6
Тема 13. Зеркальные и зеркально-линзовые объективы			
Тема 14. Нетрадиционные оптические элементы и системы			
<b>Раздел IV. Программные комплексы по расчету ОС</b>			

Тема 15. Система математических моделей и программное обеспечение для АПОС			
Тема 16. Компьютерные программы оптимизации			
Тема 17. Компьютерные технологические программы и промышленная адаптация оптических систем			
	ВСЕГО	68	32
Курсовое проектирование			16
	ИТОГО		166

## СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### РАЗДЕЛ I. АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

#### **Тема 1. Монохроматические aberrации, фигуры рассеяния и графики aberrаций**

Волновые aberrации. Связь между волновыми и геометрическими aberrациями. Пятна рассеяния при наличии сферической aberrации, комы, астигматизма. Взаимокомпенсация сферической aberrации III и V порядков. Определение aberrационных составляющих по графикам поперечных aberrаций.

#### **Тема 2. Хроматизм и оптические характеристики стекол**

Анализ хроматических aberrаций. Хроматизм положения и увеличения. Хроматизм в зрачке. Хроматические дисторсия и астигматизм. Сферохроматизм, вторичный спектр. Оптические характеристики бесцветных оптических стёкол. Материалы для ИК диапазона, для крупногабаритной оптики, для апохроматической коррекции, оптические ситаллы, керамика, zerodur.

#### **Тема 3. Aberrационные полиномы**

Суммы Зейделя. Коэффициенты монохроматических aberrаций 3-го порядка В.Н. Чуриловского. Основные формулы хроматических сумм 1-го порядка. Связь aberrаций с суммами Зейделя. Коэффициенты aberrаций для ОС с НП.

#### **Тема 4. Методы коррекции аберраций**

Основные тенденции развития методов аберрационной коррекции. Методы расчета оптических систем в области Зейделя: метод проб, композиционный, алгебраический. Условия нормировки. Методы расчета лазерных систем: радиофизические, волновые, квазиоптические, геометрические, гомеоптические.

#### **Тема 5. Компьютерные программы анализа**

Программные комплексы и промышленные пакеты универсальных и прикладных программ по расчету оптических систем: CAPO, ZEMAX, CODE-V, OSLO, OPAL, SYNOPSIS, DEMOS. Анализ программных продуктов по достоверности результатов, алгоритму, простоте интерфейса, встроенной базе данных для библиотек, ЛАОС, каталогов стекол, результатов расчета и разнообразию решаемых задач.

Комплексная оценка качества изображения (ФРТ, МТФ, ТД, ФРЛ, пограничная кривая). Основные принципы и режим ОС. Контроль граничных значений конструктивных параметров, функциональных и технологических характеристик.

#### **Тема 6. Оценка качества изображения оптических систем**

Выбор критериев оценки. Элементы теории образования изображения. Факторы, определяющие структуру оптического изображения: дифракция и аберрации. Предел разрешения, критерии дифракционной разрешающей способности. Функция рассеяния точки и оптическая передаточная функция (ОПФ). Влияние аберраций, критерий Релея для остаточных аберраций, число Штреля. Современные волновые критерии оценки качества.

## **РАЗДЕЛ II. СИНТЕЗ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

#### **Тема 7. Теория коллимированности и оптика Гаусса вдоль главного луча**

Формулы солинейного сродства. Узловые и главные фокусные расстояния. Формулы увеличений. Сложные системы. Инварианты Гульстранда-Юнга в меридиональной и сагиттальной плоскостях. Узловые и главные точки для сферической преломляющей поверхности. Инвариант Штраубеля. Условие Штебле-Лихотского.

#### **Тема 8. Базовые (силовые) элементы**

Проектирование оптических и лазерных систем методом синтеза. Классификация. Базовые линзы. Двухкомпонентные и симметричные базовые системы. Коррекционно-силовые элементы. Концентричные линзы. Би-апланатические линзы. Конфокальные системы. Линзы Смита.

### **Тема 9. Коррекционные элементы**

Апланатическая сферическая поверхность. Инвариант меридиональной комы.

Склеенные поверхности: ориентировка и оптическая сила. Линзы и компенсаторы: Анастигматические линзы. Телеанастигматы. Мениски. Деформированные плоскопараллельные пластины. Двухлинзовые и трехлинзовые компенсаторы. Симметричные и пропорциональные системы.

### **Тема 10. Компьютерные программы синтеза**

Функциональный модуль (работа) «Формирование». Программы синтеза: масштабирование и оборачивание оптической системы, ввод и удаление оптических поверхностей. Методы автоматического синтеза склейки, двойного склеенного объектива, двухкомпонентной системы, различных типов зеркально-линзовых объективов.

## **РАЗДЕЛ III. КОМПОЗИЦИЯ ОС РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

### **Тема 11. Светосильные объективы**

Двойные четырехлинзовые анастигматы. Объективы типа плазмат, Гелиос, Петцваля. Склеенные симметричные анастигматы. Пути повышения светосилы оптических систем.

### **Тема 12. Широкоугольные объективы**

Объективы типа «Лиар», «Руссар». Особоширокоугольные объективы. Дисторзирующие объективы.

### **Тема 13. Зеркальные и зеркально-линзовые объективы**

Двухзеркальные, трехзеркальные и четырехзеркальные системы. Зеркальные и зеркально-линзовые системы с компенсаторами деформаций высших порядков: пластинки Шмидта, planoиды, деформированные плоскопараллельные пластины. Компоновка сферического зеркала с плоскопараллельной пластиной. Перенос деформаций с зеркальных поверхностей на линзовые элементы. Расчет ОС для переноса изображения.

### **Тема 14. Нетрадиционные оптические элементы и системы**

Апланатические, анастигматические, план-анастигматические, ортоскопические и ахроматические линзы. Асферические линзы и зеркала. Линзы двойкой симметрии. Цилиндрические линзы. Аксиконы, линзы Френеля. ДОО и ГОЭ. Оптические растры. Градиентная оптика. Световоды и фокконы.

## РАЗДЕЛ IV. ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ПО РАСЧЕТУ ОС

### **Тема 15. Система математических моделей и программное обеспечение для АПОС**

Математические модели - объект АПОС: внешняя и внутренняя функциональная, единая универсальная, волновая, конструкционная или структурная, оптимизационная модель ОС. Дополнительные математические модели: статистическая, информационно-поисковая модель. Объектные модули со сферическими и НП. Внеосевые зеркала. Описание призм. Расчет волоконно-оптических элементов, ДОЭ и ГОЭ.

### **Тема 16. Компьютерные программы оптимизации**

Краткая сводка операторов описания исходных данных. Оптимизируемые (минимизируемые) функции. Описание параметров оптимизации. Марки параметров, характеристик и аберраций. Трансляция и процесс оптимизации. Типы задания на оптимизацию различных типов ОС. Учет экранирования и децентрировок. Контроль граничных значений конструктивных параметров, технологических характеристик.

### **Тема 17. Компьютерные технологические программы и промышленная адаптация ОС**

Оценка технологичности. Использование электронных каталогов SHOTT, SOVIRELL, OHARA, HOYA. Технологические компьютерные расчеты: расчет влияния параметров, допусков на изготовление, сборку и юстировку, параметров асферичности НП, Пересчет объективов на плавки стекол, комплектовка по толщинам. Влияние децентрировок на качество изображения. Проверка MTF и разрешения, частота Найквиста. Расчет контрольно-юстировочных ОС.

## **ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

### **Примерный перечень тем практических занятий по курсовому проектированию**

1. Габаритный расчет зеркальных и зеркально-линзовых систем.
2. Расчет зеркальной системы алгебраическим методом в области Зейделя.
3. Расчет линзовых корректоров в зеркально-линзовом объективе.
4. Расчет экранирования и виньетирования в зеркальных и зеркально-линзовых ОС.
5. Расчет бленд для защиты приемников изображения от постороннего света.
6. Расчет деформаций несферических зеркальных поверхностей.
7. Расчет ТД, ЧКХ, фокусировочных кривых (компьютерный пакет Opal).
8. Построение графиков aberrаций и оформление aberrационных выпусков.

### **Примерный перечень тем лабораторных работ**

1. Компьютерный анализ параксиальных элементов склеенного объектива.
2. Исследование сферической aberrации объектива и составляющих линз.
3. Исследование и компьютерный расчет aberrаций зеркальной системы с НП.
4. Исследование aberrаций осевого пучка в склеенном объективе.
5. Исследование поперечных aberrаций широкого внеосевого пучка в заданной ОС.
6. Синтез различных типов оптической системы в параксиальной области.
7. Компьютерное проектирование лазерных коллимирующих ОС.
8. Компьютерное проектирование лазерных фокусирующих ОС.

### **Примерное содержание курсового проектирования**

Курсовая работа, выполняемая студентами на V курсе, является важным этапом подготовки к выполнению дипломного проекта. Студенты используют техническую литературу, государственные стандарты, нормалы, патенты, справочные материалы, каталоги и архивы компьютерных программ; программы анализа и синтеза пакетов прикладных программ по расчету оптики OSLO, OPAL, ZEMAX.

Тематическое содержание курсовой работы - расчет зеркальной системы или зеркально-линзового объектива для оптико-электронного прибора.

В курсовой работе должны быть отражены вопросы, являющиеся основополагающими при расчете схем зеркальной оптики и линзовых компенсаторов:

- габаритный и абберационный расчет;
- ограничение пучков и защита плоскости изображения;
- расчет диаграмм виньетирования внеосевых пучков;
- расчет компенсаторов (в параллельных или сходящихся пучках);
- расчет профиля асферических зеркальных поверхностей;
- расчет экранирования и виньетирования;
- оценка качества изображения (волновые aberrации, ТД, ЧКХ и пр.) с учетом точности измерения и выбранным типом приемника излучения.

## Основная литература

1. Образовательный стандарт Республики Беларусь ОС РБ 1-38 01 02-2008. «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы».
2. Русинов, М.М. Техническая оптика / М.М. Русинов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 488с.
3. Слюсарев, Г.Г. Расчет оптических систем / Г.Г. Слюсарев. – Л.: Машиностроение, 1975. – 639 с.
4. Запрягаева, Л.А. Расчет и проектирование оптических систем / Л.А. Запрягаева, И.С. Свешникова. – М.: Логос, 2000. – 581 с.
5. Артюхина, Н.К. Теория, методы проектирования и расчет зеркальных систем: монография/ Н.К. Артюхина, БНТУ. – Минск, 2009. – 309 с.
6. Шрёдер, Г. Техническая оптика / Г. Шрёдер, Х. Трайбер. – М.: Техносфера, 2006. – 423 с.
7. Вычислительная оптика. Справочник / А.П. Грамматин, В.А. Зверев. Под общей ред. Русинова М.М. – М.: Книжный дом «Либроком», 2009. – 312 с.
8. Справочник конструктора оптико-механических приборов / В.А.Панов, М. Я. Кругер, В.В.Кулагин и др. Под общей ред. Панова В.А. Л.: Машиностроение, 1980. – 742с.
9. Русинов, М.М. Композиция оптических систем / М.М. Русинов. – Л.: Машиностроение, 1989. – 383 с.
10. Артюхина, Н.К. Компьютерное проектирование оптических систем: учеб-метод. пособие: в 2 ч. / Н.К. Артюхина, В.А. Марчик; Мин-во образования Респ. Беларусь; БНТУ. – Минск, 2007. – Ч. 1: Анализ центрированных оптических систем. – 105 с.
11. Артюхина Н.К. Техническая оптика: метод.пособие / Н.К. Артюхина; Мин-во образования Респ. Беларусь, БНТУ. – Минск, 2009 (гриф УМО). – 43 с.
12. Родионов, С.А. Автоматизация проектирования оптических систем / С.А. Родионов. – Л.: Машиностроение, 1982. – 270 с.
13. Марешаль, А. Структура оптического изображения / А. Марешаль, М. Франсон, пер. с фр. – М.: Мир, 1964. – 295 с.

## Дополнительная литература

1. Чуриловский, В.Н. Теория хроматизма и аберраций 3 порядка / В.Н. Чуриловский. – Л.: Машиностроение, 1982. – 312 с.
2. Герцбергер, М. Современная геометрическая оптика / М. Герцбергер. – М.: Иностран. лит. 1962. – 487 с.

3. Современные методы расчета и проектирования оптических систем: тр. ГОИ / под ред. Д.Ю. Гальперна. – Л.: Машиностроение, 1970. – Т. XXXVII; Вып. 167. – 255 с.
4. Проектирование оптических систем / Э. Бетенски [и др.]; под ред. Р. Шеннона, Дж. Вайанта, пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 430 с.
5. Артюхина, Н.К. Теория оптических систем и техническая оптика: метод. пособие / Н.К. Артюхина; Мин-во высшего и среднего спец. образования БССР, БПИ. – Минск, 1985. – 21 с.
6. [http://www.lomo-tech.ru/photos/lomo\\_kosm\\_otkr.pdf](http://www.lomo-tech.ru/photos/lomo_kosm_otkr.pdf)
7. Нефедов, Б.Л. Методы решения задач по вычислительной оптике / Б.Л. Нефедов. – М. – Л.: Машиностроение, 1966. – 198 с.
8. <http://www.zemax.com>.
9. Детали оптические асферические: ОСТ 3–4918–1993. – Введ. 01.07.94. – ОКС ТУ 4491. – 30 с.
10. Попов, Г.М. Концентрические оптические системы и их применение в оптическом приборостроении / Г.М. Попов. – М.: Наука, 1969. – 185 с.
11. Русинов, М.М. Композиция нецентрированных оптических систем / М.М. Русинов. – СПб.: СПбГУ ИТМО - Ива, 2004. – 252 с.
12. Попов, Г.М. Асферические поверхности в астрономической оптике / Г.М. Попов. – М.: Наука, 1980. – 160 с.
13. Мартин, Л. Техническая оптика /Л. Мартин. – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1960. – 420 с.

### **Компьютерные программы, электронные учебно-методические пособия**

1. Microcal™ OriginVersion 6.0 – пакет для инженерных расчетов.
2. Mathcad 2002 Professional - пакет для научных и инженерных расчетов.
3. Opal. Пакет прикладных программ для проектирования и расчета оптических систем.
4. Теория и расчет оптических систем. Электронный учебно-методический комплекс для студентов специальности 1-38 01 02. Рег. № 103 от 10.01.14

## ГЛОССАРИЙ

### А

*Аберрация* – отклонение хода [реального луча](#) от идеального ([волновая](#), [поперечная](#), [продольная](#)).

*Абсолютный контраст* – [контраст](#), равный единице.

*Апертура* (лат.–отверстие) – радиус [входного \(выходного\) зрачка](#) в обобщенных координатах.

*Апертурная диафрагма* – диафрагма, которая ограничивает размер [осевого пучка](#).

*Апертурный луч* – луч, идущий из осевой точки предмета и проходящий через край [апертурной диафрагмы](#).

*Апертурный угол* – угол между [апертурным лучом](#) и [оптической осью](#).

*Апланатизм* – явление, при котором полностью отсутствуют [монохроматические аберрации осевого пучка](#).

*Аподизация* – специально созданная неравномерность пропускания по зрачку, которая влияет на передачу структуры изображения сложного объекта.

*Апохромат* – ОС, в которой исправлен [вторичный спектр](#) (при исправлении [хроматизма положения](#)).

*Астигматизм* – аберрация, при которой в бесконечно узком пучке вдоль главного луча не совпадают изображения в меридиональном и сагиттальном сечении.

*Афокальная ОС* – система, [оптическая сила](#) которой равна нулю, а фокусное расстояние – бесконечности.

*Ахроматизированная ОС* – система, в которой исправлен [хроматизм положения](#) или [хроматизм увеличения](#).

### В

*Величина предмета (изображения)* – расстояние от оптической оси до крайней точки предмета (изображения).

*Верхний луч внеосевого пучка* – луч, проходящий через верхний край [апертурной диафрагмы](#) ([входного](#) и [выходного зрачков](#)).

*Видимое излучение* – [оптическое излучение](#) в диапазоне длин волн от 400 до 780 нанометров, видимое глазом.

*Виньетирование* – дополнительное ограничение (срезание) широкого [внеосевого пучка](#), вызванное любыми [диафрагмами](#) оптической системы, кроме [апертурной и полевой](#).

*Внеосевой пучок* – пучок лучей, выходящий из точки предмета, расположенной вне оптической оси.

*Волновая аберрация* – отклонение реального [волнового фронта](#) от идеального, измеренное вдоль луча в количестве длин волн.

*Волновой фронт* – поверхность в пространстве, для которой [эйконал](#) (фаза) поля имеет одинаковые значения.

*Вторичный спектр* – [аберрация](#), при которой положение плоскости изображения для двух дополнительных длин волн одинаковое, но не совпадает с положением плоскости изображения для основной длины волны.

*Входной зрачок* – параксиальное изображение АД, сформированное предшествующей частью ОС в обратном ходе лучей, или сама АД, расположенная в пространстве предметов.

*Выходной зрачок* – параксиальное изображение апертурной диафрагмы в [пространстве изображений](#) (АД, расположенная в пространстве изображений).

## Г

*Геометрическая оптика* – раздел оптики, в котором принимается, что длина волны пренебрежимо мала.

*Геометрически-ограниченные системы* – ОС, качество изображения которых полностью определяется картиной [поперечных aberrаций](#).

*Главные плоскости системы* – пара сопряженных плоскостей, в которых [линейное увеличение](#) равно единице.

*Главные точки  $H, H'$*  – точки пересечения [главных плоскостей](#) с [оптической осью](#) системы.

*Главный луч внеосевого пучка* – луч, идущий из внеосевой точки предмета и проходящий через центр [апертурной диафрагмы](#).

*Гомоцентрический пучок лучей* – пучок, все лучи которого пересекаются в одной точке (имеют общий [фокус](#)).

## Д

*Дальний тип предмета (изображения)* – предмет (изображение), поперечный размер которого измеряется в угловой мере, расположенный в бесконечности.

*Дефокусировка* – [aberrация](#), при которой все лучи на выходе ОС пересекаются в одной точке, не совпадающей с точкой идеального изображения (продольное смещение плоскости изображения).

*Диафрагма* – металлический экран с круглым отверстием.

*Диафрагменное число* – величина, обратная [относительному отверстию](#).

*Диск Эри* – центральный максимум в дифракционном изображении точки.

*Дисперсия оптических материалов* – зависимость [показателя преломления](#) от длины волны.

*Дисторсия* – [aberrация](#), которая приводит к нарушению подобия изображения предмету (искажению внеосевых прямых линий).

*Дифракционно-ограниченная система* – ОС, в которой качество изображения определяется явлением дифракции.

## Е

*Единичный вектор направления  $S$*  – вектор, показывающий направление распространения [волнового фронта](#).

## З

*Заднее фокусное расстояние  $f'$*  – расстояние вдоль оптической оси от [задней главной точки](#) до [заднего фокуса](#) ОС.

*Задний отрезок  $S'$*  – расстояние вдоль оптической оси от последней поверхности ОС до плоскости изображения.

*Задний фокальный отрезок*  $S'_F$  – расстояние вдоль оптической оси от последней поверхности ОС до ее [заднего фокуса](#).

*Закон Ламберта* (закон косинусов) – плоская поверхность, имеющая одинаковую [яркость](#) по всем направлениям и излучающая свет, [сила](#) которого изменяется по закону косинуса.

*Зрачковые канонические координаты* – отношение реальных зрачковых координат к [апертурам](#) (размерность этих координат не зависит от типа предмета или изображения).

## **И**

*Идеальная оптическая система* – оптическая система, в которой отсутствуют [абберации](#) и [дифракция](#), а изображение строится по законам [параксиальной оптики](#).

*Изображение* – картина, состоящая из точек пересечения лучей, выходящих из оптической системы, с некоторой поверхностью в пространстве изображений.

*Интерферограмма* – картина, наблюдаемая при [интерференции](#).

*Инфракрасное излучение* (ИК) – [оптическое излучение](#) в диапазоне длин волн от 780 нм и примерно до 4 мкм.

*Источник излучения* – некоторая поверхность, излучающая энергию.

## **К**

*Когерентные поля* – поля, для которых разность фаз ([эйконалов](#)) остается постоянной за время инерции приемника.

*Кома* – [абберация](#), при которой нарушается симметрия широкого внеосевого пучка лучей в [меридиональном сечении](#).

*Контраст периодических (гармонических) изображений* – отношение разности максимума и минимума интенсивности к их сумме.

*Коэффициент виньетирования (линейный)* – отношение линейного размера сечения внеосевого пучка лучей в плоскости входного зрачка к его диаметру.

*Коэффициент отражения* – отношение отраженного потока к падающему.

*Коэффициент пропускания*  $\tau$  – отношение прошедшего через оптическую систему светового потока к падающему.

*Кривизна* – [абберация](#), при которой наилучшее изображение получается на искривленной поверхности, а не на плоскости.

## **Л**

*Ламбертовский излучатель* – излучатель, [яркость](#) которого не зависит от положения точки на его поверхности и от угла наблюдения.

*Линейное увеличение* – отношение линейного размера изображения в направлении перпендикулярном оптической оси к сопряженному размеру предмета.

*Локальный фокус* – точка пересечения несколько [лучей](#).

*Луч* – прямая линия, вдоль которой распространяется энергия светового поля (приближение геометрической оптики).

## **М**

*Меридиональная плоскость* – любая плоскость, проходящая через [оптическую ось](#) и содержащая луч.

*Монохроматические аберрации* – [абберации](#), которые не зависят от изменения длины волны.

## **Н**

*Направляющие косинусы* – косинусы углов между [лучом](#) и осями координат, умноженные на [показатель преломления оптической среды](#).

*Негомоцентрический пучок* – пучок, не имеющий общей точки пересечения лучей пучка.

*Неизопланатизм* – отклонение от условия [изопланатизма](#).

*Нижний луч внеосевого пучка* – луч, проходящий через нижний край [апертурной диафрагмы](#) ([входного](#) и [выходного зрачков](#)).

*Нулевой луч* – фиктивный луч, который преломляется на главных плоскостях ОС, имеющий произвольные значения линейных и угловых координат.

## **О**

*Обобщенная величина предмета (изображения)* – [величина предмета \(изображения\)](#), имеющая одинаковое обозначение, но разный геометрический смысл и размерность для [ближнего](#) и [дальнего](#) типа предмета (изображения).

*Обобщенное положение предмета (изображения)* – положение предмета (изображения), имеющее одинаковое обозначение, но разный геометрический смысл и размерность для [ближнего](#) и [дальнего](#) типа предмета (изображения).

*Обобщенное увеличение* – отношение [обобщенной величины изображения](#) к обобщенной величине предмета.

*Общая дисперсия* – разность между [показателями преломления](#) для наибольшей и наименьшей длин волн, которые пропускает оптическая среда.

*Однородная среда* – среда, в которой [показатель преломления](#) не зависит от пространственных координат.

*Оптическая длина луча  $nl$*  – произведение геометрической длины пути луча на [показатель преломления](#) оптической среды, в которой распространяется излучение.

*Оптическая ось* – общая ось симметрии поверхностей, составляющих [центрированную оптическую систему](#).

*Оптическая передаточная функция* – функция, характеризующая передачу оптической системой тонкой структуры предмета через [спектр пространственных частот](#).

*Оптическая поверхность* – гладкая регулярная поверхность точно известной формы.

*Оптическая система* – совокупность оптических сред, разделенных оптическими поверхностями, содержащая диафрагмы, предназначенная для формирования изображения путем перераспределения электромагнитного поля, исходящего от предмета.

*Оптическая среда* – прозрачная однородная среда с точно известным значением [показателя преломления](#) и [дисперсией](#).

*Осевой пучок* – пучок лучей, выходящий из осевой точки предмета.

*Относительная предметная координата* – отношение реальной предметной координаты к ее максимальному значению.

Относительное отверстие  $D/f'$  – абсолютное значение отношения диаметра [входного зрачка](#) к [заднему фокусному расстоянию](#) оптической системы.

## II

*Параксиальная область* – область, бесконечно близкая к [оптической оси](#) системы.

*Параксиальные характеристики* – кардинальные отрезки оптической системы: [фокусные расстояния](#), [фокальные отрезки](#), [положения главных плоскостей](#).

*Переднее фокусное расстояние  $f$*  – расстояние от [передней главной точки](#) до [переднего фокуса](#) оптической системы.

*Передний отрезок  $S$*  – расстояние вдоль оптической оси от первой поверхности оптической системы до предмета.

*Передний фокальный отрезок  $S_F$*  – расстояние от первой поверхности оптической системы до ее [переднего фокуса](#).

*Передний фокус* – точка на оптической оси в пространстве предметов, сопряженная с бесконечно удаленной осевой точкой изображения.

*Передняя фокальная плоскость* – плоскость, перпендикулярная оптической оси и проходящая через [передний фокус](#).

*Периодическая решетка* – структура с равностоящими белыми и черными полосами.

*Плоские волны* – волны, имеющие плоские [волновые фронты](#).

*Плоскость Гаусса* (плоскость идеального изображения) – плоскость параксиального изображения.

*Плоскость изображений* – плоскость реального изображения, перпендикулярная оптической оси.

*Плоскость наилучшей установки* – плоскость изображения оптической системы наилучшего качества.

*Плоскость предметов*– плоскость предметов, перпендикулярная оптической оси.

*Показатель преломления среды по отношению к вакууму* – отношение скорости света в вакууме к скорости света в среде.

*Поле в пространстве предметов* – часть предмета, которая изображается оптической системой.

*Полевая диафрагма* – [диафрагма](#), ограничивающая размеры [поля зрения оптической системы](#).

*Положение главных плоскостей*– расстояние от первой (последней) поверхности оптической системы до [передней \(задней\) главной плоскости](#).

*Поперечные aberrации* – отклонения координат точки пересечения [реального луча](#) с плоскостью изображения от координат точки идеального изображения.

*Порог контраста* – [контраст](#), ниже которого изображение уже нельзя зарегистрировать.

*Поток излучения* (световой поток), – величина энергии, переносимой полем в единицу времени через данную площадку.

*Предельная разрешающая способность*– минимальное расстояние между двумя точками, при котором их изображение можно отличить от изображения одной точки.

*Предмет* – совокупность точек, из которых выходят лучи, попадающие в оптическую систему.

*Приведенная яркость* – отношение [энергетической яркости](#) к квадрату [показателя преломления](#).

*Приведенное (эквивалентное) фокусное расстояние* – отношение [фокусного расстояния](#) к [показателю преломления](#).

*Принцип таутохронизма* – [оптическая длина](#) любого луча между двумя [волновыми фронтами](#) одна и та же.

*Принцип Ферма*–[оптическая длина луча](#) между двумя точками минимальна по сравнению со всеми другими линиями, соединяющими эти две точки.

*Продольное увеличение*– отношение бесконечно малого отрезка вдоль оптической оси в пространстве изображений к сопряженному отрезку в пространстве предметов.

*Продольная aberrация*– это отклонение координаты точки пересечения реального луча с оптической осью от координаты точки идеального изображения вдоль оптической оси.

*Просветление оптики* – применение тонкослойных диэлектрических пленок для ослабления френелевского отражения.

*Пространственная частота*– частота [периодической гармонической решетки](#).

*Пространство изображений* – вся возможная совокупность точек изображения сопряженных с точками предмета.

*Пространство предметов*– вся возможная совокупность точек предмета.

*Пятно рассеяния* – реальное изображение светящейся точки.

**Р**

*Разрешающая способность по Фуко*– максимальная [пространственная частота](#) периодического тест-объекта с единичным [контрастом](#), при которой еще достигается минимально заданный контраст изображения.

*Реальный луч* – луч, который преломляется и отражается на реальных поверхностях оптической системы со строгим выполнением [законов отражения и преломления](#).

*Рентгеновское излучение* – [оптическое излучение](#) с длинами волн в диапазоне от 0,08 до 80 нанометров.

**С**

*Сагиттальная плоскость* – плоскость, содержащая [главный луч](#) пучка и перпендикулярная [меридиональной плоскости](#) (может быть ломаной и рассматриваться по частям).

*Световое поле* – [электромагнитное поле в оптическом диапазоне частот](#).

*Сила излучения* (энергетическая сила света) – [поток излучения](#), приходящийся на единицу [телесного угла](#), в пределах которого он распространяется.

*Сила света  $J$* – [поток излучения](#), приходящийся на единицу [телесного угла](#), в пределах которого он распространяется.

*Сопряженные линии* – линии, для которых каждая точка линии в пространстве предметов сопряжена с каждой соответствующей точкой линии в пространстве изображений.

*Сопряженные точки* – точки, одна из которых является изображением другой в соответствии с законами [параксиальной оптики](#).

*Спектр пространственных частот*– совокупность коэффициентов разложения по [пространственным частотам](#).

*Спектральная плотность потока излучения* – функция, показывающая распределение энергии по спектру излучения.

*Средний квадрат деформации* (среднеквадратическое отклонение) волнового фронта (СКВ)  $W_{СКВ}$  – квадратный корень из [дисперсии волновой аберрации](#).

*Суперапохромат* – оптическая система, в которой [вторичный хроматизм положения](#) исправлен для нескольких зон.

*Сферическая аберрация* – [аберрация](#), при которой все лучи, выходящие из осевой точки предмета, не пересекаются в одной осевой точке изображения; пучок остается радиально симметричным.

*Сферохроматизм* – разность [сферической аберрации](#) для дополнительных длин волн.

**Т**

*Тонкая линза* (тонкая ОС) – линза (ОС), осевой размер которой равен нулю и главные плоскости совмещены.  
*Точечная диаграмма лучей* ТД – картина точек пересечения лучей, равномерно распределенных по входному зрачку, с плоскостью изображения.

*Точечный источник* – источник, излучающий поток, равномерный по всем направлениям, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстоянием до него.

**У**

*Угол Брюстера* – угол, при котором происходит полная поляризация естественного света при отражении.

*Узловые точки* – точки на оптической оси, в которых [угловое увеличение](#) равно единице.

*Ультрафиолетовое излучение* (УФ) – [оптическое излучение](#) в диапазоне длин волн от 80 до 400 нанометров.

*Уравнение Гельмгольца* – [волновое уравнение](#) для монохроматического поля.

**Ф**

*Функция видности* – относительная спектральная кривая эффективности монохроматического излучения, которая показывает, как глаз воспринимает излучение различного спектрального состава.

*Функция рассеяния точки* ФРТ (PSF) – функция, описывающая зависимость распределения освещенности от координат в плоскости изображения, если предмет – светящаяся точка в центре [изопланатической зоны](#).

**Х**

*Хроматизм положения* – [абберация](#), определяющая положение плоскости изображения на оптической оси для различных длин волн.

*Хроматизм увеличения* – [абберация](#), при которой линейное увеличение ОС зависит от длины волны.

*Хроматические aberrации* – проявление зависимости характеристик ОС от длины волны света.

**Ц**

*Центрированная оптическая система* – ОС, которая имеет ось симметрии (оптическую ось) и сохраняет все свои свойства при вращении вокруг этой оси.

**Ч**

*Частотно-контрастная характеристика* ЧКХ – модуль [ОПФ](#), показывающий зависимость передачи [контраста гармонического объекта](#) от его [пространственной частоты](#).

*Число Аббе* – коэффициент относительной [дисперсии](#), величина 
$$v_\ell = \frac{n_e - 1}{n_{F'} - n_{C'}}$$
.

*Число (критерий) Штреля* – отношение значения [ФРТ](#) в ее центре при наличии [аббераций](#) к ее значению в этой точке при отсутствии aberrаций.

*Числовая апертура* – произведение синуса [апертурного угла](#) на [показатель преломления](#) пространства предметов ОС.

Э

*Эйконал* – фаза светового поля, выраженная как [оптическая длина](#) хода лучей данного пучка.

*Энергетическая освещенность* (облученность) – [поверхностная плотность потока энергии](#), падающего на поверхность.

*Энергетическая яркость* – величина [потока](#), излучаемого единицей площади в единицу телесного угла в данном направлении.

*Энергетический коэффициент пропускания* – отношение прошедшего светового потока к падающему световому потоку.