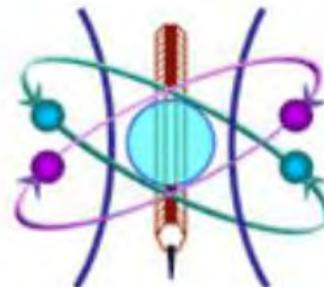


Белорусский национальный технический университет
Приборостроительный факультет
Кафедра «Лазерная техника и технология»



ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Электронный учебно-методический комплекс

РАЗДЕЛЫ ЭУМК

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

2014

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

СОДЕРЖАНИЕ КОНСПЕКТА ЛЕКЦИЙ

РАЗДЕЛ 1. ОПТОТЕХНИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	7
1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ЗАКОНЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ	7
1.1. Основные понятия и определения	7
1.2. Правило знаков	9
1.3. Законы распространения света	10
2. ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ	11
2.1. Оптическое бесцветное стекло	11
2.2. Стекла с особыми свойствами	13
2.3. Оптические кристаллы. Керамика	15
3. ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА ПЛОСКОЙ ГРАНИЦЕЙ ДВУХ СРЕД	17
3.1. Преломление лучей плоской поверхностью	17
3.2. Преломление лучей плоскопараллельной пластиной	18
3.4. Преломление лучей в призме	21
3.5. Отражательные призмы	23
3.5.1. Оптическая развертка призмы	23
3.5.2. Графоаналитический метод определения размеров призм	25
4. ИДЕАЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА	27
4.1. Линейное увеличение	27
4.2. Кардинальные элементы	27
4.3. Основные формулы для сопряженных точек и отрезков	29
4.4. Угловое и продольное увеличение	30
5. ОПТИКА НУЛЕВЫХ ЛУЧЕЙ	33
5.1. Инвариант Аббе	33
5.2. Определение фокусных расстояний одной преломляющей поверхности	34
5.3. Вычисление хода нулевых лучей через ОС	35
5.4. Определение кардинальных элементов по ходу нулевого луча	37
5.5. Расчет кардинальных элементов линзы	38
5.6. Формула нулевого луча для многокомпонентной системы	40
5.7. Оптическая система из двух компонентов	40
6. ОГРАНИЧЕНИЕ ПУЧКОВ СВЕТА	44
6.1. Диафрагмы	44
6.2. Формула Гаусса для зрачков	46

6.3. Методика определения апертурной диафрагмы.....	47
6.4. Полевая диафрагма. Поле зрения оптической системы.....	47
6.5. Геометрическое виньетирование.....	48
6.6. Коэффициенты виньетирования. Действующее отверстие входного зрачка.....	49
7. ПРОХОЖДЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.....	51
7.1. Энергетические величины.....	51
7.2. Видимая область спектра. Световые величины.....	52
7.3. Коэффициенты отражения, поглощения, рассеяния и пропускания.....	55
7.4. Яркость отраженных и преломленных лучей, световые трубки.....	56
7.5. Инвариант Штраубеля.....	57
7.6. Коэффициент пропускания оптической системы.....	58
7.7. Световой поток, проходящий через оптическую систему.....	59
7.8. Освещенность изображения. Светосила.....	61
8.1. Прохождение осевого пучка лучей через сферическую поверхность.....	64
8.2. Апланатические точки.....	65
8.3. Инварианты Аббе-Юнга.....	66
8.3.1. Меридиональный инвариант.....	66
8.3.2. Сагиттальный инвариант.....	67
8.4. Анастигматические поверхности.....	67
8.5. Выбор начальных данных для расчета хода лучей. Параметры внеосевых пучков.....	68
9. АБЕРРАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	70
9.1. Монохроматические aberrации 3-го порядка.....	70
9.1.1. Геометрический смысл aberrаций.....	70
9.1.2. Сферическая aberrация.....	71
9.1.3. Кома.....	72
9.1.4. Астигматизм и кривизна поверхности изображения.....	73
9.1.5. Дисторсия.....	74
9.2. Хроматические aberrации 1-го порядка.....	75
9.2.1. Хроматизм положения.....	75
9.2.2. Хроматизм увеличения.....	77
9.3. Выражение aberrаций ОС через aberrации ее компонентов.....	77
9.3.1. Формулы для вычисления aberrаций системы после окуляров визуальных приборов.....	78
9.3.2. Допустимые значения остаточных aberrаций в различных оптических системах.....	79
РАЗДЕЛ 2. ТИПОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.....	81
10. ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.....	81
10.1. Оптические характеристики.....	81
10.2. Объективы и окуляры телескопических систем.....	82

10.3. Ограничение пучков лучей в телескопической системе	84
10.4. Габаритный расчет трубы Кеплера	86
10.5 Расчет системы Галилея	88
10.6 Фокусировка окуляра в зрительной трубе	90
10.7. Расчет коллектива для зрительной трубы Кеплера	90
11. ПРОЕКЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ	92
11.1. Основные характеристики проекционных систем	92
11.2. Расчет эпископической проекционной системы	94
11.3. Расчет диаскопической проекционной системы	96
11.4. Осветительные системы проекционных приборов	98
11.5. Оптическая система прожектора	101
12. МИКРОСКОПЫ	106
12.1. Оптические характеристики микроскопа	106
12.2. Глубина изображаемого пространства микроскопа	108
12.3. Ограничение пучков	109
12.4. Разрешающая способность микроскопа	110
13. ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЛУПЫ	113
13.1. Основные характеристики	113
13.2. Видимое увеличение лупы	113
13.3. Расчет углового поля зрения при наличии виньетирования	115
13.4. Типы луп	117
14. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЛАЗА, КОРРЕКЦИЯ ЗРЕНИЯ	118
14.1. Строение глаза	118
14.2. Оптическая система глаза	119
14.3. Недостатки зрения	121
15. ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ	123
15.1. Оптические характеристики фотообъективов	123
15.2. Критерий добротности	127
15.3. Глубина изображаемого пространства и глубина резкости изображения	128
15.4. Разрешающая способность фотообъектива	131
15.5. Частотно-контрастная характеристика	133
15.6. Пограничная кривая	136
16. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ	137
16.1. Волновая абберация	137
16.2. Компьютерная оценка качества изображения в программной среде OPAL	139
16.3. Современная оценка качества изображения оптической системы	146

ВВЕДЕНИЕ

Целью изучения дисциплины «Теория и расчет оптических систем» является обучение основным принципам проектирования типовых оптических систем, теоретическим основам образования изображения в оптических и оптико-электронных приборах, а также методам габаритного и абберационного расчета оптических систем, оценки качества изображения с помощью ПЭВМ.

При конструировании оптических приборов, которые широко применяются во всех отраслях науки, техники и народного хозяйства, большое значение имеет правильный выбор и расчет оптической системы, от которой зависят не только успешная работа прибора, но его габариты, масса и объем принимаемой информации. В данной дисциплине изучаются основополагающие вопросы по расчету оптических систем, приводятся теоретические сведения построения изображения, создания элементов, базовых моделей и схемных решений основных типов оптических систем, анализа качества изображения и абберационной коррекции, адаптации реальных оптических систем для производства.

Теория и расчет оптических систем – прикладная оптическая наука, изучающая принципы проектирования оптических систем и методы образования оптического изображения; закладывает теоретический фундамент специальных инженерных знаний и решает множество задач, возникающих перед инженерами оптической отрасли при расчете оптических систем, а также при конструировании, изготовлении, сборке и юстировке оптических приборов. Это одна из основных дисциплин вузов, готовящих специалистов оптического приборостроения.

Дисциплина базируется на знаниях, полученных в результате изучения дисциплин: «Физика» (элементы волновой теории света и геометрической оптики, интерференция света, дифракция, поляризация и дисперсия, фотометрия); «Волновая оптика» (поток энергии, принцип суперпозиции, волновой пакет, параметры электромагнитных волн); «Математика» (степенные ряды, дифференциальное и интегральное исчисление).

Основной задачей преподавания дисциплины является подготовка студентов к последующему изучению специальных курсов «Оптико-электронные приборы и системы», «Техническая оптика», «Компьютерное проектирование оптических и лазерных систем», «Оптические измерения», «Методы контроля параметров оптических систем», а также будущей практической деятельности.

В результате освоения дисциплины «Теория и расчет оптических систем» будущий специалист должен *знать*:

- свойства идеальных оптических систем;
- принципы действия оптических деталей и типовых оптических систем;
- методы ограничения пучков лучей в реальных конструкциях оптики;

– основы теории aberrаций и aberrационной коррекции оптических систем;

и *уметь*:

– выполнять светотехнические, габаритные и aberrационные расчеты оптических систем;

– производить подбор оптических элементов с учетом требуемого качества изображения;

– производить вычисление хода лучей и aberrаций оптической системы с помощью ПЭВМ.

Основными методами (технологиями) обучения, отвечающими целям изучения дисциплины «Теория и расчет оптических систем», 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 курсового проекта.

РАЗДЕЛ 1. ОПТОТЕХНИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ЗАКОНЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

1.1. Основные понятия и определения

Современный оптический прибор состоит из нескольких блоков и элементов, взаимодействующих между собой: оптическая система (ОС), предмет и изображение, которое воспринимается приемником изображения. Для правильной работы ОС необходимо согласовывать оптические характеристики ее звеньев. Первым звеном определяется предмет, а последним – изображение.

Предмет может быть самосветящимся – источником излучения (солнце, звезды, лампы накаливания, газоразрядные лампы и др.) или несамосветящимся, освещаемым другим источником излучения (обычно через специальную осветительную систему). Приемником изображения может быть человеческий глаз, экран проектора, фотопленка или различные фотоэлектронные устройств (ПЗС-матрица, электронно-оптический преобразователь ЭОП и т. д.). Основная функция оптического прибора выполняется с помощью оптической системы. Описание работы оптического прибора предполагает знание характеристик его элементов (например, разрешающая способность приемника изображения определяет требуемое разрешение для ОС).

Оптическая система – совокупность оптических сред, разделенных оптическими поверхностями, содержащая диафрагмы и предназначенная для формирования изображения посредством перераспределения электромагнитного поля, исходящего от предмета. Все оптические системы условно делят на четыре класса в зависимости от положения предмета и его изображения.

Оптическое излучение занимает в спектре электромагнитных поля диапазон длин волн от 1 нм до 1 мм (табл. 1.1). Границы условны.

Таблица 1.1. Диапазоны длин волн

γ -лучи	Рентгеновское излучение	УФ излучение	Видимое излучение	ИК излучение	Радиоволны
До 0,01нм	0,01– 1 нм	1нм–0,38 мкм	0,38-0,77 мкм	0,77мкм -1мм	Более 1мм

Геометрическая оптика рассматривает формирование изображений с помощью световых лучей, являющихся независимыми и прямолинейными в однородной среде и преломляющимися (отражающимися) на границах раздела сред с разными оптическими свойствами.

Система оптических поверхностей называется *центрированной*, если центры всех поверхностей лежат на одной прямой (рис. 1.1).

Линия, соединяющая центры сферических поверхностей, представляет собой ось симметрии центрированной системы и называется *оптической осью*.

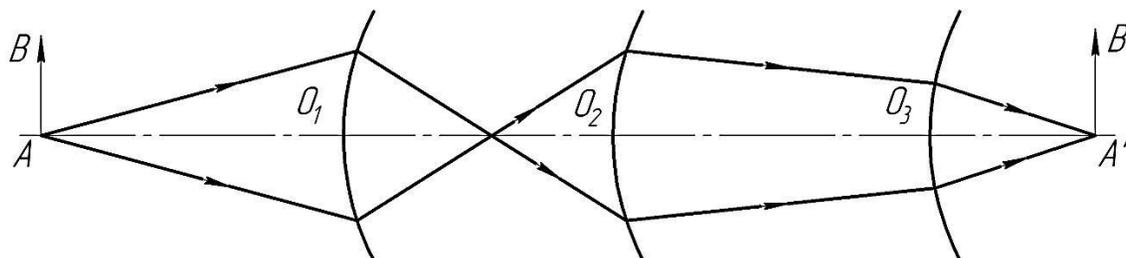


Рис. 1.1. Центрированная оптическая система

Светящаяся точка – источник излучения бесконечно малых размеров. *Световой луч* – прямая линия, вдоль которой распространяется энергия излучения. Световому лучу в физической оптике соответствует нормаль к поверхности световой волны.

Гомоцентрический пучок – совокупность лучей, имеющих общую точку пересечения. Центр гомоцентрического пучка, входящего в оптическую систему, называется *предметной точкой*, а центр гомоцентрического пучка, вышедшего из оптической системы, называется *изображением предметной точки*. Центр параллельного гомоцентрического пучка лежит в бесконечности. Всякий предмет и его изображение в геометрической оптике рассматриваются как совокупность предметных точек и их изображений. Если после прохождения через оптическую систему пучки лучей сохраняют гомоцентричность, то каждой точке предмета соответствует только одна точка изображения.

Две точки, одна из которых является изображением другой, называют *сопряженными*, изображение сопряженной точки принято отмечать той же буквой, что и предмет, но со штрихом. Изображение, образованное пересечением самих лучей, называют *действительным*, а изображение, образованное пересечением их геомет-

рических продолжений, мнимым. *Пространство предмета* – пространство, в котором находятся предметные точки. *Пространство изображения* – пространство, в котором расположены изображения предметных точек.

1.2. Правило знаков

Для удобства чтения оптических схем приняты единые правила знаков (рис. 1.2). Положительным направлением считается распространение света слева направо.

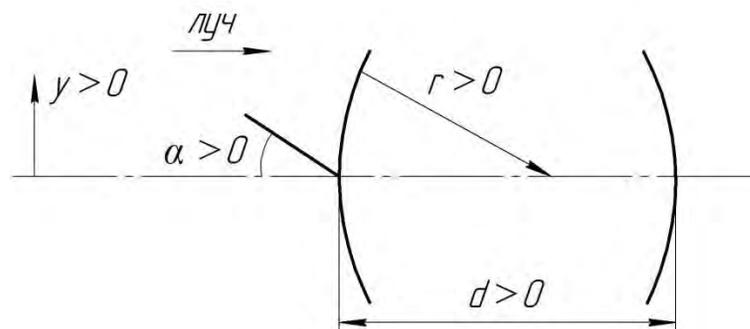


Рис. 1.2. Правило знаков

a. линейные отрезки вдоль оси считаются положительными, если направление их отсчета от оптической системы совпадает с направлением света и отрицательным в противоположном случае;

b. радиус кривизны поверхности считается положительным, если центр кривизны находится справа от поверхности, и отрицательным, если слева;

c. величины толщин линз и других оптических деталей, а также воздушных промежутков между преломляющими поверхностями считаются положительными;

d. высоты пересечения лучей с поверхностями и величины предметов и изображений считаются положительными вверх от оптической оси и отрицательными – вниз от оси;

e. угол луча с оптической осью считается положительным, если для совмещения оси с лучом ось нужно вращать по часовой стрелке, и отрицательным, если вращение производится против часовой стрелки;

f. углы между лучами и нормалью к поверхности в точке падения луча (углы падения и преломления) считаются положительными, если для совмещения нормали с лучом её нужно вращать по часовой стрелке, и отрицательными, если вращение производится против часовой стрелки.

1.3. Законы распространения света

Закон прямолинейного распространения света: распространение света между двумя точками в однородной и изотропной среде осуществляется по прямой линии.

Закон независимого распространения света: отдельные лучи и пучки, встречаясь друг с другом и пересекаясь, не оказывают взаимного влияния.

Закон преломления: лучи падающий и преломленный вместе с нормалью к поверхности в точке падения находятся в одной плоскости, а отношение синуса угла падения лучей к синусу угла преломления для двух данных оптических сред есть величина постоянная:

$$\frac{\sin \varepsilon}{\sin \varepsilon'} = n_{12} = \text{const} \quad (1.1)$$

$$n \cdot \sin \varepsilon = n' \cdot \sin \varepsilon' \quad (1.2)$$

Закон отражения: лучи падающий и отраженный вместе с нормалью к поверхности в точке падения луча находится в одной плоскости, а угол отражения равен углу падения, но противоположен ему по знаку (частный случай закона преломления для $n' = -n$):

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

Явление полного внутреннего отражения: происходит при распространении света из более плотной оптической среды в менее плотную: $n' < n$. Сущность явления: при определенных значениях угла падения ε пучок света не проходит во вторую среду, а отражается от границы их раздела.

При некотором угле ε_m (предельный угол полного внутреннего отражения) угол ε_m' равен 90° , т.е. преломленный луч пойдет вдоль границы раздела двух сред.

$$\sin \varepsilon_m = \frac{n'}{n} \quad (1.4)$$

Явление широко используется в оптических приборах (в конструкциях призм, системах освещения шкал, сеток).

2. ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

2.1. Оптическое бесцветное стекло

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

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

- λ_H, λ_B – нижняя и верхняя границы спектрального рабочего интервала;
- λ_O – основная длина волны.

В табл. 2.1. приведены стандартные спектральные линии видимого диапазона.

Оптическое стекло характеризуется следующими основными свойствами: оптической однородностью, прозрачностью, твердостью, химической стойкостью и т. д.

Таблица 2.1. Спектральные линии видимого диапазона

Обозначение линий	Длина волны, нм	Область спектра	Обозначение линий	Длина волны, нм	Область спектра
<i>I</i>	365,0	Ультрафиолетовая	<i>e</i>	546,07	Зеленая
<i>H</i>	404,66	Фиолетовая	<i>d</i>	587,56	Желтая
			<i>D</i>	589,29	
<i>g</i>	435,83	Синяя	<i>c'</i>	643,85	Красная
<i>F'</i>	479,99		<i>C</i>	656,27	
<i>F</i>	486,13		<i>r</i>	706,52	

Оптическое стекло характеризуется:

- показателем преломления для различных волн n_λ (основным принят показатель преломления n_e для длины волны $\lambda = 546,07$ нм спектральной линии ртути);
- средней дисперсией, равной разности показателей преломления для определенных длин волн ($n_i - n_g$ характеризует ближнюю ультрафиолетовую синюю области спектра; $n_{F'} - n_{C'}$ и $n_F - n_C$ видимую область, а $n_r - n_{1013,9}$, $n_{1013,9} - n_{2249,3}$ инфракрасную область спектра);
- коэффициентом дисперсии ν_λ (величину $\nu_\ell = \frac{n_e - 1}{n_{F'} - n_{C'}}$ называют основным коэффициентом дисперсии или числом Аббе);
- относительной частной дисперсией $\gamma = \frac{\Delta n}{n_{F'} - n_{C'}}$, где Δn – частная дисперсия, например, $n_{F'} - n_{C'}$;
- термooптическими постоянными.

Постоянные для оптического бесцветного стекла приведены в табл.2.2.

Спектральные характеристики материалов необходимы для согласования интервала длин волн, которые излучает предмет и в котором образуется изображение.

Таблица 2.2. Основные постоянные стекла

Коэффициент дисперсии (число Аббе):	$\nu_e = \frac{n_e - 1}{n_{F'} - n_{C'}}$
Относительная частная дисперсия	$\gamma = \frac{\Delta n}{n_{F'} - n_{C'}}$
Температурное изменение n	$\beta_{abc}(t, \lambda) = \Delta n_{abc} \frac{\lambda}{\Delta t}$

Оптические стекла условно делят на две группы: кроны и флинты. Кроны имеют обычно малую дисперсию, а флинты – 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. Каждый тип стекла в зависимости от состава и оптических характеристик делится на марки (табл. 2.3).

2.2. Стекла с особыми свойствами

Цветные оптические стекла (ГОСТ 9411-94) получают введением в состав стекла красителей; используются для изготовления светофильтров. Обозначают двумя-тремя буквами и цифрой (первая, вторая буква являются обозначением цвета, например, СЗ – сине-зеленые, Ж – желтые, К – красные, буква С – от слова стекло; цифра обозначает порядковый номер стекла по увеличению плотности окраски). Основными характеристиками цветного стекла являются показатель преломления, коэффициент пропускания для различных длин волн и оптическая плотность, определяемая густотой окраски также для различных длин волн.

Оптические кварцевые стекла (ГОСТ 15130-79) обладают высокой термостойкостью, малым коэффициентом линейного расширения, химической и радиационной устойчивостью, прозрачностью в широком диапазоне длин волн. Прозрачны в УФ области спектра (марка КУ), в видимой (КВ), в ИК области (КИ). Применяется для изготовления уголковых отражателей, призм спектральных приборов, оболочек источников света и других оптических деталей, подвергающихся резким изменениям температуры.

Оптические ситаллы имеют особо тонкозернистую структуру с кристаллами размером, составляющим около половины длины волны видимого участка спектра. Показатели преломления кристаллов и стеклообразного вещества, в котором они равномерно распределены, одинаковы или близки между собой, что исключает рассеяние света на границе раздела кристалл-стекло. Ситаллы имеют повышенную термостойкость, механическую прочность и твердость, малый коэффициент линейного расширения. Марки ситаллов: СО-115 (астроситалл) обладает близким к нулю коэффициентом линейного расширения; СО-156 имеет повышенную прозрачность в видимой области спектра, но меньшую термостойкость; СО-21 имеет отрицательный коэффициент линейного расширения в диапазоне 0–350°C, что обеспечивает высокую термостойкость. Применяются для изготовления ответственной оптики (астрономических зеркал, пробных стекол, обтекателей, защитных экранов).

Люминесцирующие стекла содержат неодим, имеют узкие полосы люминесценции, причем на полосу 1060 нм приходится до 80% всей энергии люминесценции. Стекла обозначают индексом ГЛС (генерирующее

люминесцирующее стекло). Они применяются для изготовления активных элементов твердотельных лазеров направленного излучения с длинами волн 900, 1060, 1300 нм.

Таблица 2.3. Параметры основных марок стекла

Марка стекла	Показатель преломления		Средняя дисперсия	
	n_e	n_D	$n_F - n_c$	$n_F - n_C$
ЛК6	1,4721	1,4704	0,00708	0,00704
ЛК7	1,4846	1,4828	0,00732	0,00728
К8, К108	1,5183	1,5163	0,00812	0,00806
К100	1,5237	1,5215	0,0088	0,00875
БК6, БК106	1,5421	1,5399	0,00913	0,00905
БК8, БК108	1,5489	1,5467	0,00877	0,00871
БК10, БК110	1,5713	1,5688	0,01024	0,01015
ТК2, ТК102	1,5749	1,5724	0,01005	0,00996
ТК14, ТК114	1,6155	1,6130	0,01020	0,01012
ТК16, ТК116	1,6152	1,6126	0,01059	0,01050
ТК20, ТК120	1,6247	1,6220	0,01107	0,01097
ТК21, ТК121	1,6600	1,6568	0,01299	0,01285
ТК23	1,5915	1,5891	0,00970	0,00962
КФ4	1,5203	1,5181	0,00886	0,00879
БФ12, БФ112	1,6298	1,6259	0,01622	0,01601
БФ16	1,6744	1,6709	0,01435	0,01419
БФ24	1,6386	1,6344	0,01750	0,01726
ЛФ5, ЛФ105	1,5783	1,5749	0,01409	0,01392
Ф1	1,6169	1,6128	0,01681	0,01689
Ф101	1,6179	1,6138	0,01681	0,01659
Ф104	1,6290	1,6247	0,01762	0,01738
Ф6	1,6170	1,6031	0,01611	0,01590
ТФ1, ТФ101	1,6622	1,6475	0,01940	0,01912
ТФ3	1,7 32	1, 7172	0,02469	0,02431
ТФ5, ТФ105	1,7617	1,7550	0,02788	0,02743

Инфракрасные бескислородные стекла (ИКС) прозрачны в диапазоне длин волн от 1 до 17 мкм и имеют высокую химическую стойкость, механическую и термическую прочность.

Фотохромные стекла (ФХС) обратимо изменяют свою прозрачность в зависимости от величины освещенности и длительности облучения. Основными характеристиками являются коэффициент фотохромности K_{ϕ} , чувствительность S_{ϕ} , например, стекло ФХС3 имеет $K_{\phi} = 0,5-0,7$; $S_{\phi} = (2-5) \cdot 10^{-6} \text{ (лк*с)}^{-1}$. Применяются для изготовления светофильтров и светозащитных очковых стекол.

Светорассеивающие стекла (молочные МС) диффузно рассеивают проходящий или отраженный свет благодаря введению в их состав соединений фтора, кремнефтористого натрия и других соединений.

Органические стекла – бесцветные или окрашенные пластмассы. В качестве органического стекла со свойствами, близкими к кроновым стеклам, используется полиметилметакрилат (плексиглас марок СОЛ, СТ1) и целлулоид, а со свойствами флинта – полистирол. Органическое стекло – дешевый материал, легко обрабатывается, формуется, склеивается, обладает высокой прозрачностью для ультрафиолетового и видимого участков спектра, но имеет ряд существенных недостатков: большой коэффициент линейного расширения, малая механическая и химическая устойчивость. Применяют для неотвеченной оптики (лупы, линзы Френеля и т.д.).

2.3. Оптические кристаллы. Керамика

Хлористый натрий (NaCl) – мягкий природный кристалл, прозрачен в области 0,250–3,0 мкм, гигроскопичен, растворим в воде и глицерине (при $\lambda=2,0\text{мкм}$ $n=1,52$).

Бромистый калий (KBr) – очень мягкий однородный дешевый кристалл ($n=1,54$ при $\lambda=2,0\text{мкм}$), прозрачен в области 0,21–27,0 мкм, гигроскопичен, растворим в воде и глицерине.

Хлористый калий (KCl) – природный сильвин, мягкий, достаточно однороден, гигроскопичен, хорошо растворим в воде, щелочах, эфире и глицерине, прозрачен в диапазоне 3,3–21,0 мкм.

Материалы NaCl, KCl и KBr используются для изготовления призм ИК-диапазона.

Фтористый кальций (CaF₂) – природный флюорит, твёрдый, очень хрупкий, дорогостоящий кристалл (при $\lambda=2,0\text{мкм}$ $n=1,42$), прозрачен в области 1,8–10,0 мкм, негигроскопичен и практически нерастворим в воде. Применяется для изготовления деталей микроскопов и призм спектроскопов.

Фтористый литий (LiF) – кристалл средней твёрдости, однороден, негигроскопичен, практически нерастворим в воде. Прозрачен в области спектра 1,8–6,0 мкм, ($n=1,38$ при $\lambda=2,0 \text{ мкм}$).

Германий (Ge) – хрупкий синтетический кристалл, хорошо пропускает излучение в области 2,0–15,0 мкм и 40,0–60,0 мкм ($n=4,12$ при $\lambda=2,0 \text{ мкм}$). Применяются для изготовления деталей, работающих в ИК-диапазоне.

Кремний (Si) – синтетический кристалл, хрупкий, не растворим в воде, непрозрачен в видимой области спектра, хорошо пропускает излучение в диапазоне 15,0–22,0 мкм ($n=3,46$ при $\lambda=2,0$ мкм).

Кварц кристаллический (SiO₂) – синтетический кристалл (в природе горный хрусталь), имеет слабо выраженное двойное лучепреломление, прозрачен в области 1,8–10,0 мкм, ($n=1,52$ для обыкновенного луча при $\lambda=2,0$ мкм), в воде не растворим, используется для деталей спектральных и поляризационных приборов.

Кальцит (CaCO₃) – синтетический кристалл (в природе исландский шпат), очень хрупкий и нетермостойкий, имеет сильно выраженное двойное лучепреломление, пропускает видимую и ближнюю ИК-области, (для обыкновенного луча $n=1.66$ при $\lambda=0,56$ мкм), применяется в деталях поляризационных приборов.

Фтористый магний (MgF₂) – кристалл средней твёрдости (природный селлаит), достаточно однороден, не растворим в воде, хорошо пропускает излучение в области спектра 0,1–1,0 мкм, ($n=1,38$ при $\lambda=0,4–0,7$ мкм). Используется для изготовления оптических деталей в спектроскопических и вакуумных приборах, интерференционных и интерференционно-поляризационных фильтров.

Лейкосапфир – искусственный кристалл, беспримесный корунд (Al₂O₃); изготавливается следующих марок: ЛУ – для УФ, ЛВ – для видимой и ЛИ – для ИК-области спектра.

Природный корунд (сапфир) – очень твёрдый, термостойкий кристалл, устойчив практически против всех химикатов. Рубин (добавка 0,05% хрома) – применяется для изготовления активных элементов лазеров.

Оптическая керамика – поликристаллический материал, изготавливаемый методом горячего прессования под большим давлением в вакууме, обладает высокой механической прочностью и высокой термостойкостью. Изготавливается нескольких марок, прозрачных для $\lambda=1,0–20,0$ мкм (КО4) и для $\lambda=1,0–8,0$ мкм (КО5). Не растворим в воде, хорошо обрабатывается, устойчив к тепловым ударам. Используется для изготовления окон, подложек интерференционных фильтров и других деталей оптических систем в ряде ИК-приборов.

3. ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА ПЛОСКОЙ ГРАНИЦЕЙ ДВУХ СРЕД

3.1. Преломление лучей плоской поверхностью

Гомоцентричность пучка лучей, преломленного плоской поверхностью, не сохраняется, а изображение предметной точки широким гомоцентрическим пучком перестает быть точечным.

На рис.3.1 обратное продолжение преломленного луча ВС встречает оптическую ось в точке A' (изображение предметной точки).

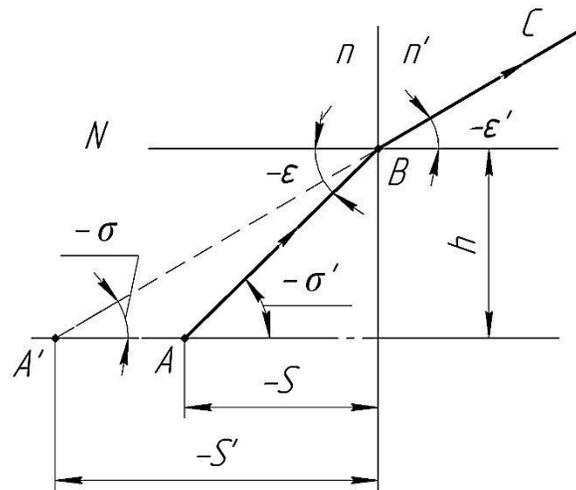


Рис.3.1. Прохождение плоской границы двух сред

Положение изображения относительно границы двух сред определяется отрезком S' , которое является нелинейной функцией угла σ :

Задний отрезок	$S' = S \frac{n'}{n} \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \sigma \left(1 - \frac{n'^2}{n^2} \right)}$	3.1
----------------	---	-----

3.2. Преломление лучей плоскопараллельной пластиной

Плоскопараллельная пластина – оптическая деталь, содержащая две параллельные между собой плоские преломляющие грани (входную и выходную).

Луч, падающий на пластину перпендикулярно входной грани, проходит пластинку без преломления (рис.3.2). После прохождения через плоскопараллельную пластину луч параллелен первоначальному направлению (CD параллельно AB).

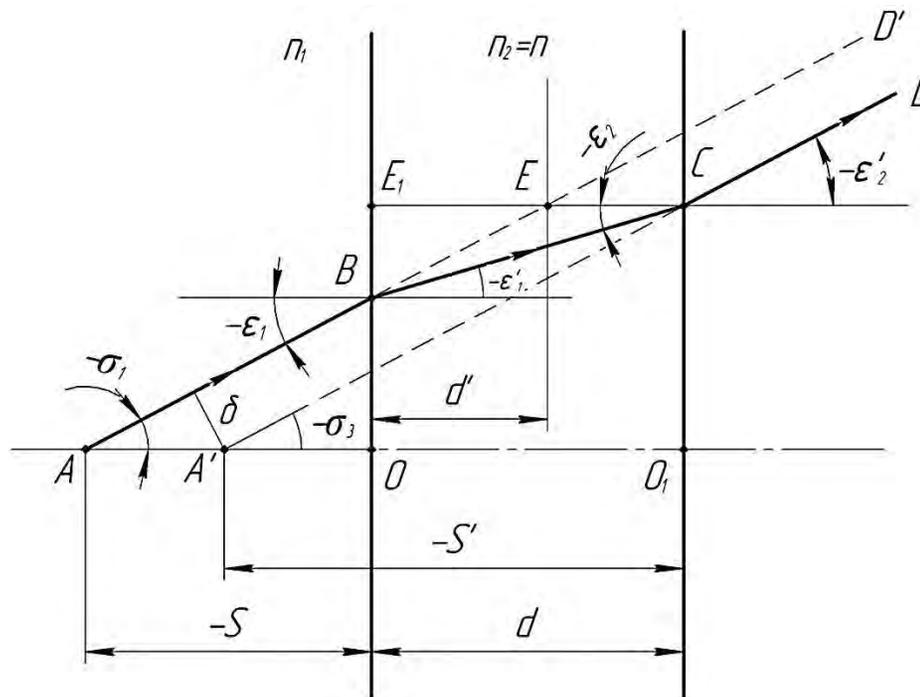


Рис.3.2. Работа плоскопараллельной пластины

Продольное смещение изображения AA' обозначено отрезком Δ , а поперечное – δ . После выхода из пластины пучок теряет гомоцентричность, изображение предметной точки A делается нерезким. Это положение справедливо как для расходящегося, так и для сходящегося пучка.

Редуцированная толщина	$EE_1 = d' = d \frac{tg \epsilon_1'}{tg \epsilon_1}$	3.2
Продольное смещение изображения	$\Delta = d - d' = d \left(1 - \frac{tg \epsilon_1'}{tg \epsilon_1} \right)$ $\Delta = d \left(1 - \frac{cos \epsilon_1}{\sqrt{n^2 - sin^2 \epsilon_1}} \right)$	3.3
Поперечное смещение	$\delta = \Delta sin \epsilon_1 = d sin \epsilon_1 \left(1 - \frac{cos \epsilon_1}{\sqrt{n^2 - sin^2 \epsilon_1}} \right)$	3.4
При малых углах падения ($\epsilon_1 \leq 30^\circ$)	$\Delta_0 = \frac{n-1}{n} a$	3.5
	$d'_0 = \frac{d}{n}$	3.6

Замена стеклянной пластины эквивалентной воздушной пластиной называется *редуцированием* или приведением оптической среды пластины к воздуху. Толщина редуцированной пластины равна отрезку EE_1 и определяется по формуле (3.2), которая для малых углов падения ($\epsilon_1 \leq 30^\circ$) преобразовывается к виду

$$d'_0 = \frac{d}{n}, \quad (3.6)$$

Толщина реальной пластины d устанавливается в зависимости от ее максимального поперечного светового размера ($D_{св}$): $d = \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{15} \right) D_{св}$. Материалом для изготовления пластин служит обычно стекло К8, реже стекло ЛК5, ситаллы, кварц.

3.3. Отражение лучей плоским зеркалом

Любое изображение, образованное нечетным числом плоских зеркал, является зеркальным. Для получения прямого изображения необходимо использовать четное число плоских зеркал.

При повороте плоского зеркала на угол φ (рис.3.3) из положения 1 в положение 2 отраженный луч отклоняется от первоначального направления на угол

$$\delta = 2\varphi \quad (3.7)$$

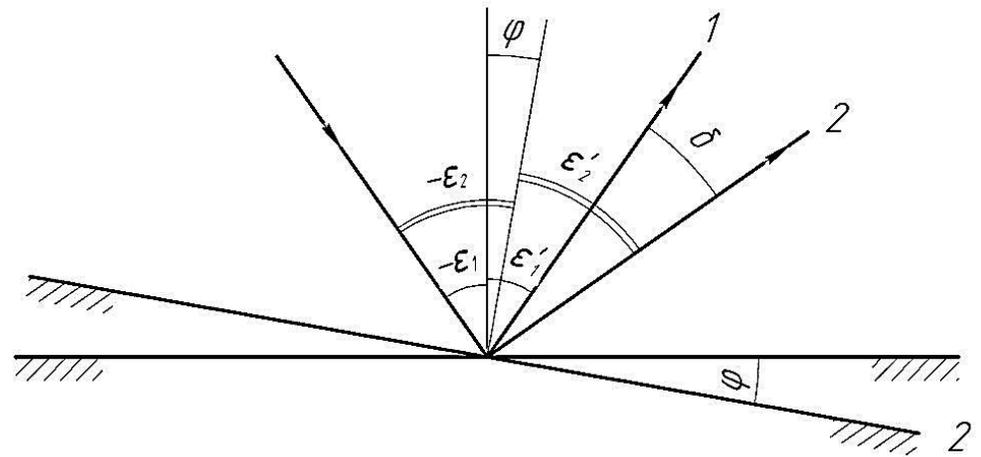


Рис.3.3. Поворот плоского зеркала

Качающееся зеркало	$\delta = 2\varphi$	3.7
Двойное зеркало	$\omega = 2\gamma$	3.8

При прохождении луча через систему из двух плоских зеркал, угол между которыми равен γ (рис.3.4), луч отклоняется от первоначального направления на угол ω , равный удвоенному углу между зеркалами, который не зависит от направления падающего луча

$$\omega = 2\gamma$$

(3.8)

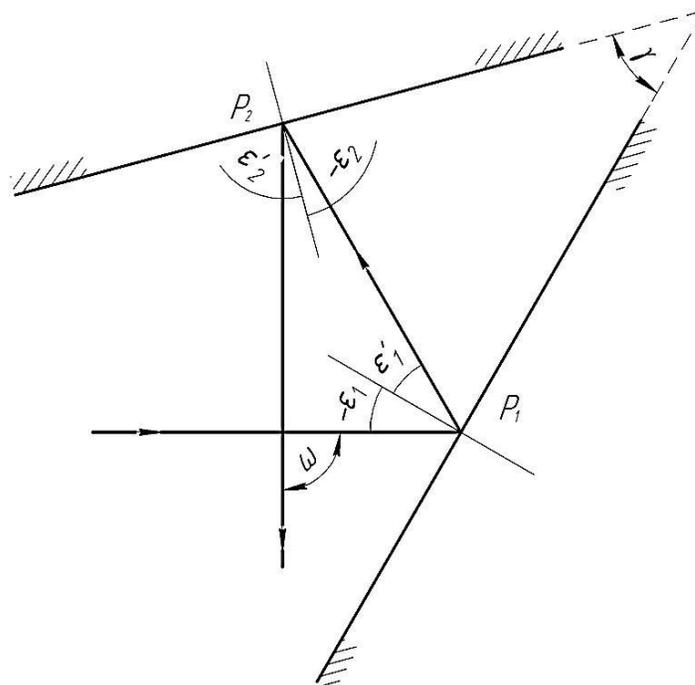


Рис.3.4. Двойное зеркало

При повороте системы из двух зеркал угол отклонения луча остается постоянным, а направление выходящего из системы луча сохраняется неизменным и не зависит от поворота системы. Это свойство двойного зеркала очень ценно для конструирования и используется при юстировке оптических приборов. Двойное зеркало практически чаще всего осуществляется в виде пентапризмы.

3.4. Преломление лучей в призме

Преломляющая призма – оптическая деталь, ограниченная двумя преломляющими непараллельными плоскостями (рис.3.5). Главным сечением призмы называется сечение призмы плоскостью, перпендикулярной ребру двугранного угла между плоскостями.

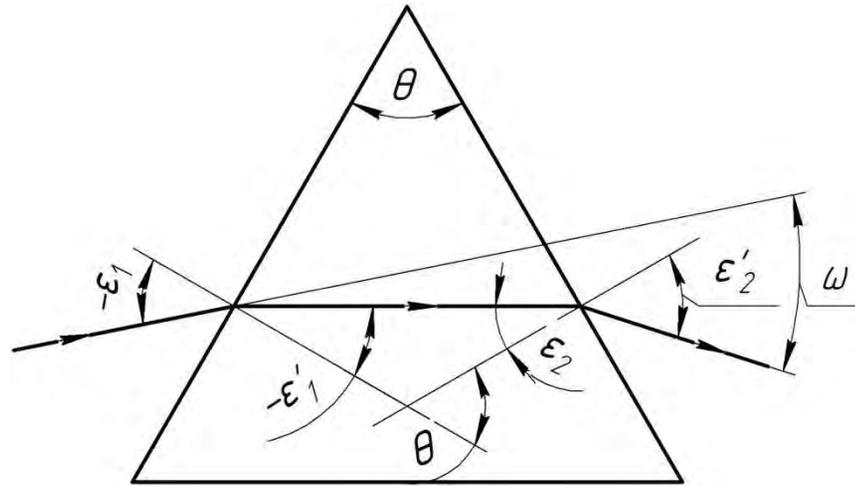


Рис.3.5. Преломляющая призма

Угол отклонения	$\omega = -\epsilon_1 + \epsilon'_2 - \theta$	3.9
При симметричном ходе	$\epsilon'_1 = -\epsilon_2, \epsilon_1 = -\epsilon'_2$	3.10
Закон преломления на двух гранях	$\sin \epsilon_1 = n \cdot \sin \epsilon'_1,$ $\sin \epsilon'_2 = n \cdot \sin \epsilon_2 = n \cdot \sin(\epsilon'_1 + \theta)$	3.11
Расчет минимального отклонения	$\sin \frac{\omega_{\min} + \theta}{2} = n \cdot \sin \frac{\theta}{2}$	3.12
Для малых углов ϵ_1	$\omega_0 = \theta(n-1)$	3.13

Преломляющий угол призмы – это угол между плоскостями призмы в ее главном сечении.

За начало отсчета угла отклонения выбирается направление падающего луча. Угол призмы считается положительным, если вершина обращена вверх.

3.5. Отражательные призмы

Отражательные призмы используют для оборачивания изображения, изменения направления оптической оси, изменения направления линии визирования, компенсации поворота изображения и т.д. Основные типы отражательных призм приведены в справочниках. Преимущества отражательных призм перед плоскими зеркалами следующие:

- углы между зеркалами требуют регулировки;
- при полном внутреннем отражении отсутствуют потери света.

3.5.1. Оптическая развертка призмы

Развертка призмы – последовательное построение изображений призмы вместе с осевым лучом во всех ее отражающих гранях.

Призма подобно плоскопараллельной пластине нарушает гомоцентричность пучка лучей, проходящего в ней. Для любой призмы толщина d эквивалентной пластины определяется k – коэффициентом призмы и D – световым диаметром пучка, входящего в призму.

Толщина d эквивалентной пластины	$d = k \cdot D$	3.14
------------------------------------	-----------------	------

Перевертывая контур сечения призмы вокруг каждой его стороны, соответствующей отражающей грани, в той последовательности, в которой происходят отражения луча от отражающих граней, мы выполним ее развертку и построим эквивалентную плоскопараллельную пластину, толщина d которой равна длине пути луча внутри призмы. Прием позволяет определить длину хода осевого луча в призме.

Построив оптическую развертку, можно определить коэффициент любой призмы (кроме призм с крышей).

Форма и размеры призм с крышей и без крыши имеют существенные отличия при одинаковом диаметре D светового пучка, падающего на входную грань.

Для призмы (рис.3.6) находим $d = AC' = AC = 2D$, следовательно, $k = 2$.

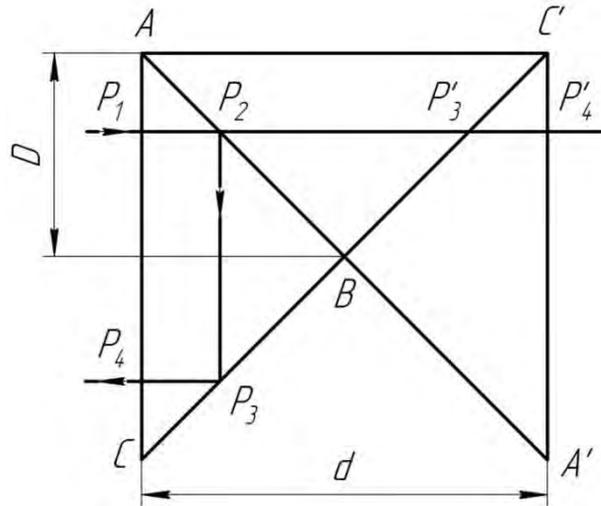


Рис.3.6. Призма с двумя отражениями

Для пентапризмы, изображенной на рис.3.7, имеем $d = l_1 + l_2 + l_3 = (2 + \sqrt{2}) D$, $k = 3,4142$.

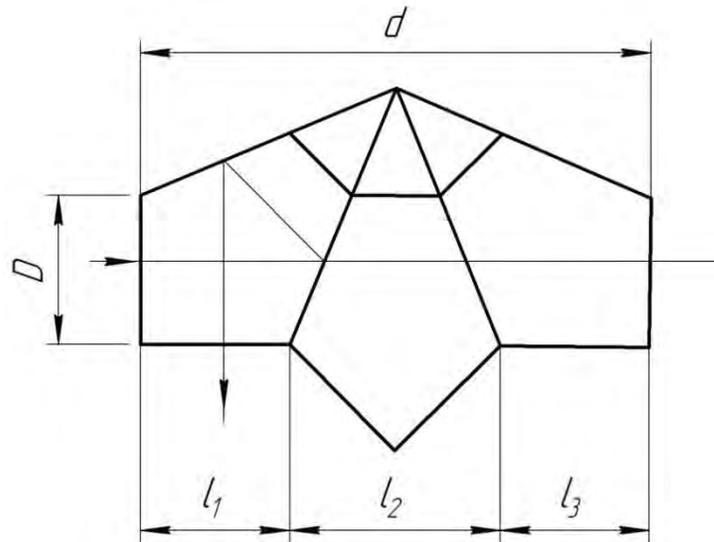


Рис.3.7. Развертка пентапризмы

3.5.2. Графоаналитический метод определения размеров призм

В участке сходящегося пучка лучей в оптическом приборе (рис.3.8) необходимо расположить призму определенного типа. M_1M_2 – световое отверстие объектива, а N_1N_2 – плоскость промежуточного изображения.

Методика определения размеров призм, предложенная Турыгиным И.А., заключается в следующем:

1. Задается положение одной из преломляющих граней; не рекомендуется помещать грань в плоскости промежуточного изображения, так как возможные дефекты поверхности грани будут отчетливо видны в поле зрения оптической системы. Если плоскость изображения рассматривается через окуляр с фокусным расстоянием $f'_{ок}$, то последнюю грань призмы желательно располагать на расстоянии $c \geq 0,01 f_{ок}'^2$ от этой плоскости.

2. Рассчитывается угол ψ , образованный оптической осью и прямой, проведенной через крайнюю точку входной грани редуцированной развертки призмы.

$$tg\psi = \frac{D}{2d'_0} = \frac{n}{2k}, \quad (3.15)$$

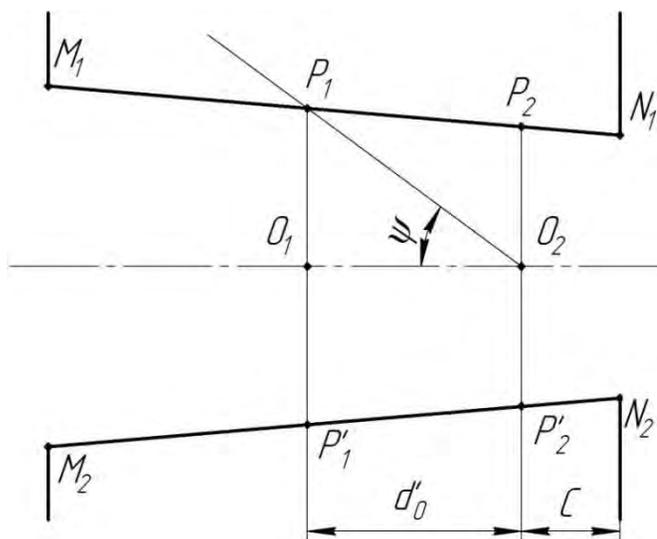


Рис.3.8. Расположение призмы в приборе

где n – показатель преломления; d'_0 – редуцированная толщина оптической развертки; k – коэффициент заданной призмы (определяется по справочнику или рассчитывается по развертке призмы).

3. Из осевой точки O_2 выходной грани призмы проводится прямая под углом ψ к оптической оси и отмечается точка P_1 пересечения прямой с габаритным лучом M_1N_1 .

4. Через точку P_1 проводится прямая, определяющая положение входной грани редуцированной развертки призмы, толщина которой $d'_0 = O_1O_2$, световой диаметр пучка $D = P_1P'_1$. Длина хода луча в призме (толщина эквивалентной пластины – развертки) d определяется по формулам (3.6) или (3.14) в зависимости от того, какая из величин d'_0 или D получены графически.

5. Определяются углы между гранями призмы в ее главном сечении с помощью формул аналитической геометрии и рассчитываются все остальные размеры заданной призмы.

4. ИДЕАЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Под идеальной оптической системой (ИОС) понимается система, образующая *резкое* изображение точек предмета при сохранении его подобия с помощью гомоцентрических широких пучков лучей. Теория идеальной центрированной оптической системы была разработана Гауссом, поэтому ее часто называют *оптикой Гаусса*.

4.1. Линейное увеличение

Линейное увеличение – отношение величины изображения y' к величине предмета y , определяет масштаб изображения, является постоянным и не зависит от размера предмета.

Линейное увеличение	$\beta = \frac{y'}{y}$	4.1
---------------------	------------------------	-----

Изменение увеличения при перемещении предмета вдоль оптической оси происходит в широких пределах от $-\infty$ до $+\infty$. При $\beta > 0$ полученное изображение будет прямым по отношению к предмету, при $\beta < 0$ – перевернутым. Если $|\beta| > 1$, изображение получается увеличенным по сравнению с предметом, а если $|\beta| < 1$ – уменьшенным.

4.2. Кардинальные элементы

Главные плоскости – пара сопряженных перпендикулярных к оптической оси плоскостей, в которых линейное увеличение равно единице. Сопряженные между собой точки пересечения H и H' главных плоскостей с оптической осью называются *главными точками* (рис. 4.1).

Точка F' , сопряженная с бесконечно далекой точкой пространства предметов, расположенной на оптической оси, – *задний фокус* оптической системы. Все лучи, параллельные оптической оси, после прохождения через оптическую систему, пересекаются в заднем фокусе F' . Плоскость, перпендикулярная к оптической оси и проведенная через точку F' , – *задняя фокальная плоскость*. Она сопряжена с бесконечно далекой плоскостью пространства предметов. Точку F , сопряженную с бесконечно далекой точкой оптической оси пространства изображений, – *передний фокус*. Все лучи, проходящие в пространстве предметов через передний фокус F , по-

сле выхода из ИОС становятся параллельными оптической оси. Отрезки f и f' , отсчитываемые от главных точек H и H' до фокусов F и F' , называются *передним и задним фокусным расстоянием*.

Фокусы, фокальные плоскости, главные плоскости, главные точки и фокусные расстояния называют *кардинальными элементами* оптической системы.

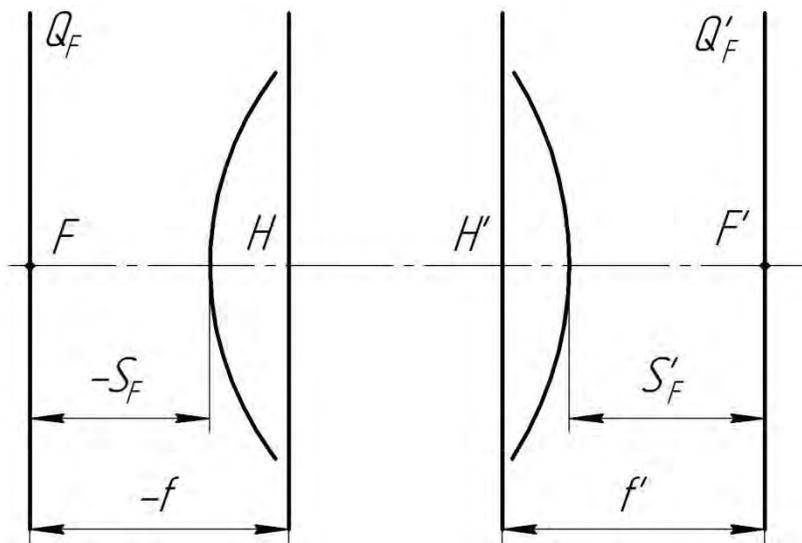


Рис.4.1. Расположение кардинальных точек

Взаимосвязь фокусных расстояний	$-\frac{f}{f'} = \frac{n}{n'}$	4.2
Для однородной среды	$-f = f'$	4.3

4.3. Основные формулы для сопряженных точек и отрезков

Основные формулы для сопряженных точек и отрезков можно получить согласно рис. 4.2.

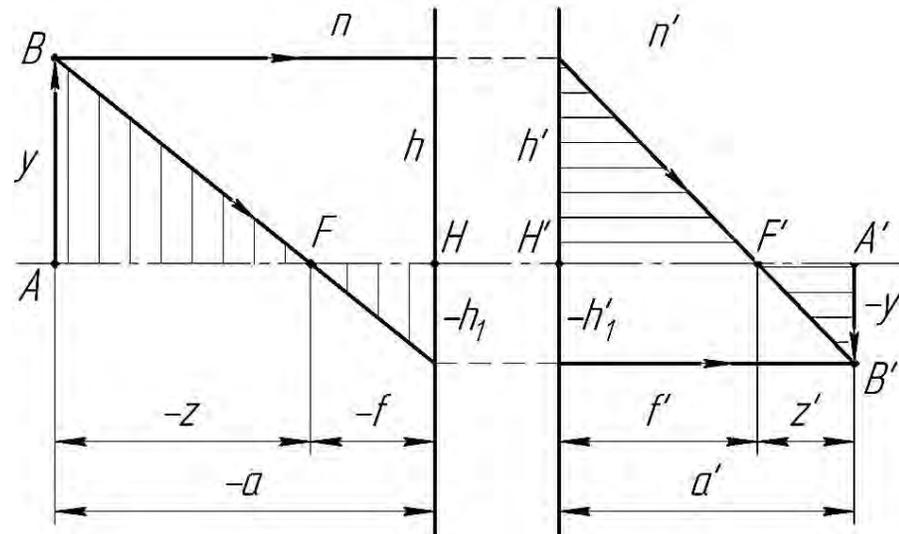


Рис. 4.2 Построение изображения

Формула Ньютона	$zz' = ff'$	4.4
Формула Гаусса	$\frac{f'}{a'} + \frac{f}{a} = 1$	4.5

Связь отрезков a и a' , определяющих положение предмета и изображения относительно главных плоскостей и линейного увеличения определена формулой $\frac{a'}{a} = -\beta \frac{f'}{f}$.

Зная отрезки a и a' , можно рассчитать линейное увеличение β .

Линейное увеличение	$\beta = -\frac{f}{z} = -\frac{z'}{f'}$ $\beta = \frac{n}{n'} \cdot \frac{a'}{a} = -\frac{f}{f'} \cdot \frac{a'}{a}$	4.6
Отрезки от главных точек	$a = \frac{(\beta-1)}{\beta} \cdot f$ $a' = (1-\beta) \cdot f$	4.7
Оптическая сила ИОС	$\Phi = \frac{n'}{f'}$	4.8
Линейная величина изображения для бесконечно удаленного предмета	$y' = \frac{n}{n'} \cdot f' \cdot \text{tg}\omega$	4.9
Угловая величина бесконечно удаленного изображения	$\text{tg}\omega' = \frac{y}{f'}$	4.10

4.4. Угловое и продольное увеличение

Угловым увеличением γ ИОС называется отношение тангенсов углов с оптической осью сопряженных лучей в пространстве предметов (рис.4.3) и изображений.

Угловое увеличение	$\gamma = \frac{\text{tg}\sigma'}{\text{tg}\sigma}$ $\gamma = \frac{a}{a'}$	4.11
	$\gamma = -\frac{f}{f' \cdot \beta} = \frac{n}{n' \cdot \beta}$	4.12

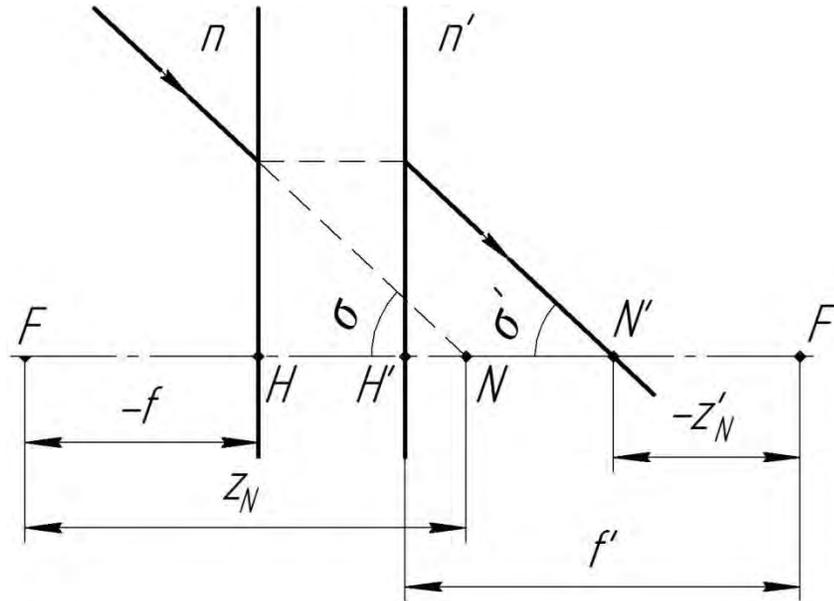


Рис.4.3. Положение узловых точек

Линейное увеличение в узловых точках	$\beta_N = -\frac{f}{Z_N} = -\frac{Z'_N}{f'} = -\frac{f}{f'}$	$Z_N = f', Z'_N = f$	4.13
Положение узловых точек	$HN = H'N' = Z_N + f = f' + f = Z'_N + f'$		4.14

Инвариант – функция параметров хода луча, не меняющая численного значения при прохождении луча через поверхность. Инвариант, сохраняющий численное значение при прохождении через всю оптическую систему, называется *полным*. Инвариант Гюйгенса-Гельмгольца для ИОС является полным.

Продольным увеличением α оптической системы называется отношение размера изображения малого отрезка, расположенного вдоль оптической оси, к размеру этого отрезка.

Инвариант Гюйгенса-Гельмгольца	$n \cdot \operatorname{tg} \sigma \cdot y = n' \cdot \operatorname{tg} \sigma' \cdot y'$	4.15
Продольное увеличение	$\alpha = \frac{\rho}{\rho'} \quad \alpha = -\frac{ff'^2}{Z^2} = -\frac{Z'}{Z}$	4.16
Связь увеличений	$\alpha = -\frac{f'}{f} \cdot \beta^2 = \frac{\beta}{\gamma}$	4.17

5. ОПТИКА НУЛЕВЫХ ЛУЧЕЙ

Часть пространства вокруг оптической оси, внутри которого углы лучей с оптической осью и с нормальными к поверхностям настолько малы, что величины синусов и тангенсов этих углов можно заменить величинами углов, выраженных в радианной мере, называется *параксиальной областью*. Лучи, идущие внутри параксиальной области, называются *параксиальными*.

5.1. Инвариант Аббе

Прохождение параксиального луча через сферическую преломляющую поверхность, разделяющие среды с разным показателем преломления представлено рис. 5.1.

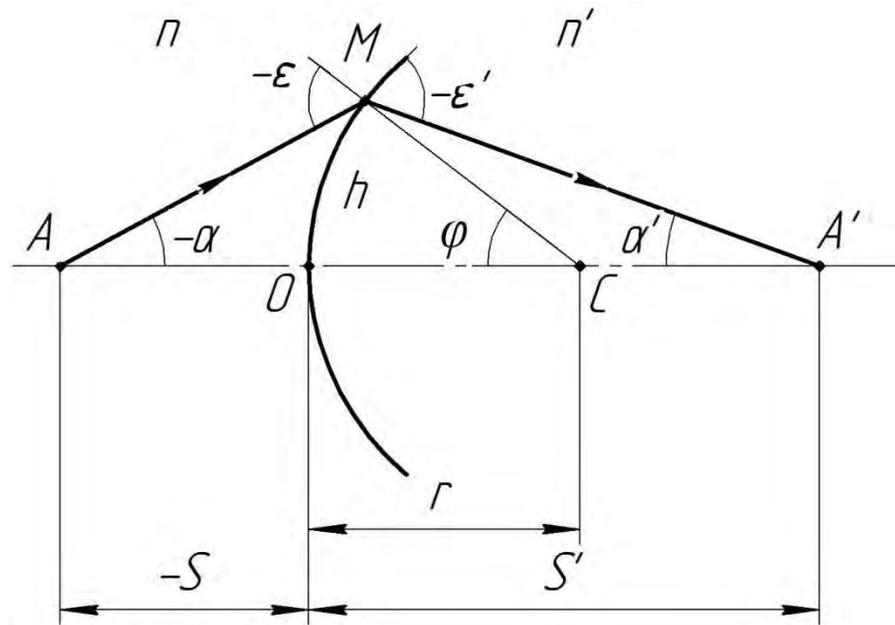


Рис.5.1. Прохождение параксиального луча

Инвариант Аббе связывает передний и задний отрезки S и S' , позволяя определить один из них, если известен второй:

- для плоской преломляющей поверхности инвариант Аббе: $\frac{n'}{S'} - \frac{n}{S} = 0$;
- для сферической отражающей поверхности ($n' = -n$): $\frac{1}{S'} + \frac{1}{S} = \frac{2}{r}$.

Закон преломления в параксиальной области	$n \cdot \varepsilon = n' \cdot \varepsilon'$	5.1
Инвариант Аббе для сферической преломляющей поверхности	$n \left(\frac{1}{S} - \frac{1}{r} \right) = n' \left(\frac{1}{S'} - \frac{1}{r} \right)$	5.2

Отрезок S' не зависит от угла α , т.е. гомоцентрический пучок параксиальных лучей после прохождения через преломляющую поверхность остается гомоцентрическим.

Следовательно, *все формулы и положения ИОС справедливы в параксиальной области.*

5.2. Определение фокусных расстояний одной преломляющей поверхности

Заднее фокусное расстояние	$f' = \frac{n' \cdot r}{n' - n}$	5.3
Переднее фокусное расстояние	$f = \frac{-nr}{n' - n}$	5.4
Связь фокусных расстояний	$-\frac{f}{f'} = \frac{n_1}{n_p}$	5.5
Фокусное расстояние для отражающей поверхности	$f' = f = \frac{r}{2}$	5.6
Инвариант Гюйгенса-Гельмгольца в параксиальной области	$-f \cdot y_1 \cdot \alpha_1 = f' \cdot y_p' \cdot \alpha_p'$	5.7

Через вершину преломляющей (отражающей) поверхности проходит пара сопряженных плоскостей, линейное увеличение в которых равно единице, т.е. в вершине находятся совпадающие главные точки H, H' . Главные плоскости поверхности сливаются в одну плоскость, являющуюся касательной к вершине поверхности.

5.3. Вычисление хода нулевых лучей через ОС

Нулевым лучом называют фиктивный луч, преломляющийся на главных плоскостях поверхностей, но встречающийся с ними на конечных расстояниях от оптической оси и отсекающий на оптической оси такие же отрезки, что и параксиальный луч (рис.5.2).

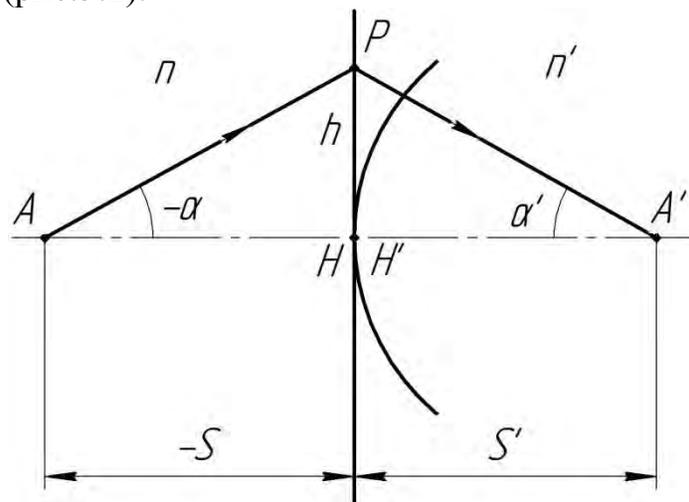


Рис.5.2. Прохождение нулевого луча

Формулы расчета хода нулевого луча значительно проще формул расчета реального луча, т.к. применение нулевого луча предусматривает получение идеального изображения.

Обычно $tg\alpha$ обозначают через α .

При расчете хода нулевого луча через оптическую систему, состоящую из нескольких поверхностей, пользуются формулами (уравнениями) расчета углов и высот нулевого луча, проходящего через ρ поверхностей при определенной нумерации (рис.5.3).

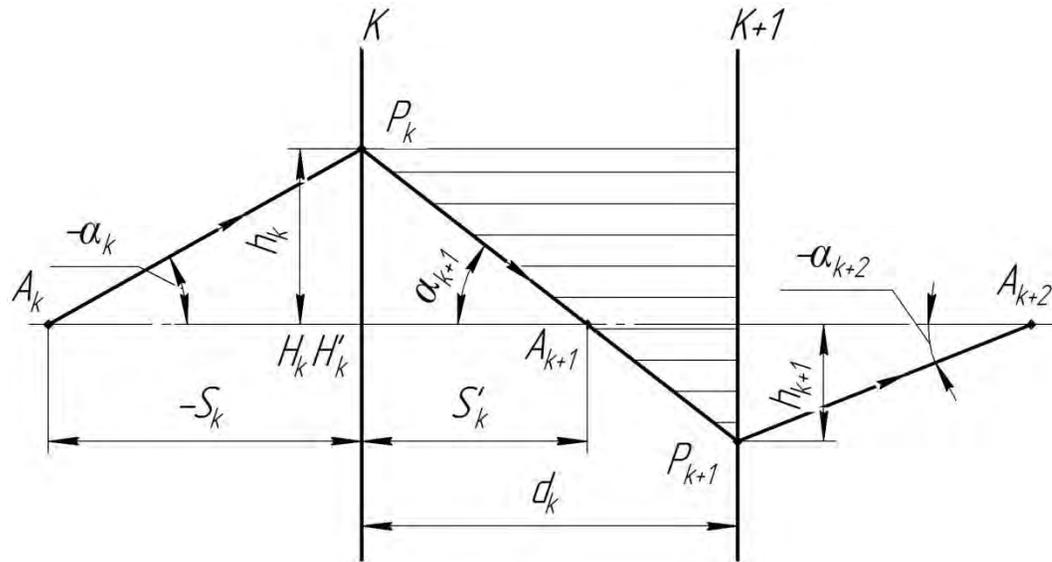


Рис.5.3. Нумерация поверхностей

Формула углов для одной поверхности	$\operatorname{tg}\alpha' = \frac{n}{n'} \operatorname{tg}\alpha + h \frac{n' - n}{n' r}$	5.8
Формула углов нулевого луча	$\alpha_{k+1} = \frac{n_k}{n_{k+1}} \cdot \alpha_k + h_k \frac{n_{k+1} - n_k}{n_{k+1} r_k}$	5.9
Формула высот нулевого луча	$h_{k+1} = h_k - \alpha_{k+1} \cdot d_k$	5.10
Расчетная формула радиуса поверхности	$r_k = \frac{h_k (n_{k+1} - n_k)}{n_{k+1} \cdot \alpha_{k+1} - n_k \alpha_k}$	5.11

5.4. Определение кардинальных элементов по ходу нулевого луча

Расчет хода нулевого луча от бесконечно удаленной осевой точки предмета используется для определения заднего фокусного расстояния f' и заднего вершинного фокусного расстояния S'_F оптической системы, состоящей из p поверхностей.

Условия нормировки: угол α_1 принимается равным нулю, высота h_1 произвольна.

При расчете нулевого луча используется *основное свойство главных плоскостей*: точка пересечения луча, входящего в систему, и луча, выходящего из системы, лежит на эквивалентной задней главной плоскости (рис.5.4.).

Задний фокальный отрезок	$S'_F = \frac{h_p}{\alpha_{p+1}}$	5.12
Фокусное расстояние	$f' = \frac{h_1}{\alpha_{p+1}}$	5.13
Линейное увеличение	$\beta = \frac{n_1 \alpha_1}{n_{p+1} \alpha_{p+1}}$	5.14

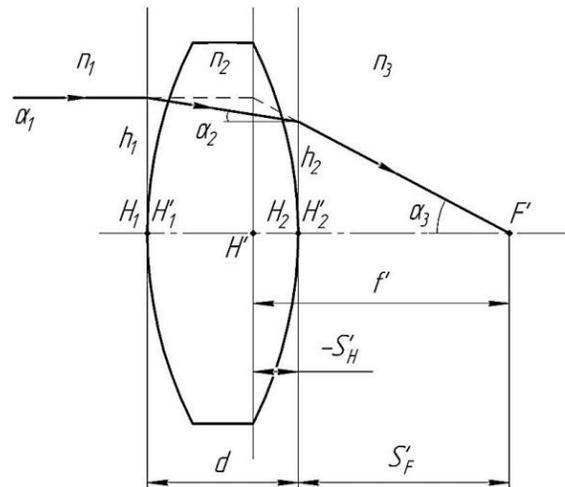


Рис.5.4. Прохождение нулевого луча через линзу

5.5. Расчет кардинальных элементов линзы

Линза – оптическая деталь, ограниченная двумя преломляющими поверхностями, являющимися поверхностями тел вращения. Рассмотрим преломляющее действие отдельной линзы со сферическими поверхностями (рис.5.4). Это действие определяется фокусным расстоянием f и f' .

Конструктивные параметры линзы: радиусы кривизны поверхностей r_1 и r_2 ; осевая толщина d и показатель преломления n_2 .

Оптическая сила линзы в неоднородной среде	$\frac{n_3}{f'} = \left(\frac{n_2 - n_1}{r_1} + \frac{n_3 - n_2}{r_2} \right) - \frac{(n_2 - n_1)(n_3 - n_2)}{n_3 n_2 r_1 r_2} d$	5.15
Задний фокальный отрезок	$S'_F = f' \left(1 - \frac{n_2 - n_1}{n_2 r_1} d \right)$	5.16
Оптическая сила линзы в обратном ходе лучей	$\frac{n_1}{f} = \left(\frac{n_1 - n_2}{r_1} + \frac{n_2 - n_3}{r_2} \right) + \frac{(n_1 - n_2)(n_2 - n_3)}{n_1 n_2 r_1 r_2} d$	5.17
Передний фокальный отрезок	$S_F = f \left(1 + \frac{n_2 - n_3}{n_2 r_2} d \right)$	5.18
Расчетная формула фокусного расстояния для линзы в воздухе	$\frac{1}{f'} = -\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n-1)^2 d}{n r_1 r_2}$	5.19
Задний фокальный отрезок для линзы в воздухе	$S'_F = f' \left(1 - \frac{n-1}{n \cdot r_1} d \right)$	5.20
Передний фокальный отрезок для линзы в воздухе	$S_F = f \left(1 + \frac{n-1}{n \cdot r_2} d \right) = -f' \left(1 + \frac{n-1}{n \cdot r_2} d \right)$	5.21

Линза, у которой центры кривизны поверхностей совпадают, называется *концентрической*. Условие концентричности: $d = r_1 - r_2$. Линза, оптическая сила которой равна нулю, называется *телескопической*.

Положение главных точек в линзе	$S'_H = -f' \left(\frac{n-1}{n \cdot r_1} \right) d; \quad S_H = f \left(\frac{n-1}{n \cdot r_1} \right) d = -f' \frac{n-1}{n \cdot r_2} d$	5.22
Расстояние между главными плоскостями	$\Delta_{HH'} = d \cdot \left[1 - \frac{f'}{n} (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right]$	5.23
Тонкая линза $d = 0$	$\frac{1}{f'} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$ $S'_{F'} = f'; \quad S_F = -f$ $S_H = S'_H = \Delta_{HH'} = 0$	5.24
Плосковыпуклая (плосковогнутая) линза	$f' = -f = -\frac{r_2}{n-1}$ $S'_{F'} = f'; \quad S_F = \frac{r_2}{n-1} + \frac{d}{n}$	5.25
Положения главных плоскостей	$S'_H = 0; \quad S_H = \frac{d}{n}; \quad \Delta_{HH'} = \frac{n-1}{n} a$	5.26
Концентрическая линза $d = r_1 - r_2$	$\Phi = \frac{1}{f'} = \frac{n-1}{n \cdot r_1 \cdot r_2} d$ $S'_H = r_2; \quad S_H = r_1; \quad \Delta_{HH'} = 0$	5.27
Связь конструктивных параметров в телескопической линзе $\Phi = 0$	$r_1 - r_2 = \frac{n-1}{n} a$	5.28

5.7. Формула нулевого луча для многокомпонентной системы

Формула углов нулевого луча	$\alpha_{K+1} = -\frac{f_K}{f'_K} \alpha_K + \frac{h_K \Phi_K}{n_{K+1}}$ $\alpha_{K+1} = \frac{n_K}{n_{K+1}} \alpha_K + \frac{h_K \Phi_K}{n_{K+1}}$	5.29
Формула углов для ОС в воздухе	$\alpha_{K+1} = \alpha_K + h_K \Phi_K$	5.30
	$h_{K+1} = h_K - \alpha_{K+1} d_K$	5.31

Сложная оптическая система состоит из нескольких компонентов. Под компонентом понимается как отдельная линза, так и несколько склеенных линз, или линз, поверхности которых соединены оптическим контактом. Тонким компонентом условно называют компонент, толщина которого по оптической оси принимается равной нулю, а главные плоскости совпадают.

Оптическая сила сложной системы	$\Phi = \frac{n_{P+1} \cdot \alpha_{P+1}}{h_1} \quad \Phi = \frac{1}{h_1} \sum_{K=1}^{K=P} h_K \Phi_K$	5.32
	$\Phi_K = \frac{n_{K+1} \alpha_{K+1} - n_K \alpha_K}{h_K}$	5.33

5.8. Оптическая система из двух компонентов

На рис. 5.5. показан ход нулевого луча *от бесконечно удаленной осевой точки предмета*.

Расчет луча используется в оптической системе, состоящей из двух поверхностей для определения:

- заднего фокусного расстояния f' ;
- расстояния от совмещенных главных плоскостей второго компонента до задней эквивалентной фокальной плоскости a'_F .
- расстояния от совмещенных главных плоскостей второго компонента до задней главной плоскости всей системы a'_H .

Условия нормировки: угол α_1 принимается равным нулю, высота h_1 произвольна.

Оптическая сила двухкомпонентной системы в неоднородной среде	$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - \frac{\Phi_1 \Phi_2 d}{n_2}$	5.34
Положение переднего и заднего фокусов	$a_F = \frac{-n_1 \left(1 - \frac{\Phi_2 d}{n_2}\right)}{\Phi} = \left(1 + \frac{d}{f_2}\right) f$ $d'_F = \frac{n_3 \left(1 - \frac{\Phi_1 d}{n_2}\right)}{\Phi} = \left(1 - \frac{d}{f'_1}\right) f'$	5.35
Положение передней и задней главной точек	$a_H = a_F - l$ $d'_H = d'_F - f'$	5.36
Оптическая система в воздухе	$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d$ $d'_F = \frac{1 - \Phi_1 d}{\Phi} = \left(1 - \frac{d}{f'_1}\right) f'$ $a_F = -\frac{1 - \Phi_2 d}{\Phi} = -\left(1 - \frac{d}{f'_2}\right) f'$	5.37

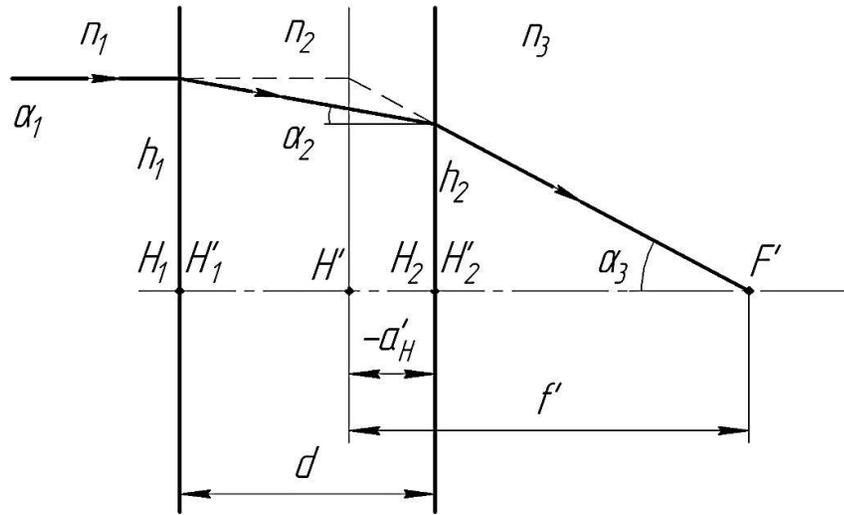


Рис. 5.5. Построение заднего фокуса двухкомпонентной системы

В случае, когда *предмет находится на конечном расстоянии* и задано линейное увеличение β двухкомпонентной системы, можно получить формулы для отрезков a_1 и a'_2 . По рис.5.6 находим

$$a_1 = z + a_F, \quad a'_2 = z' + a'_F.$$

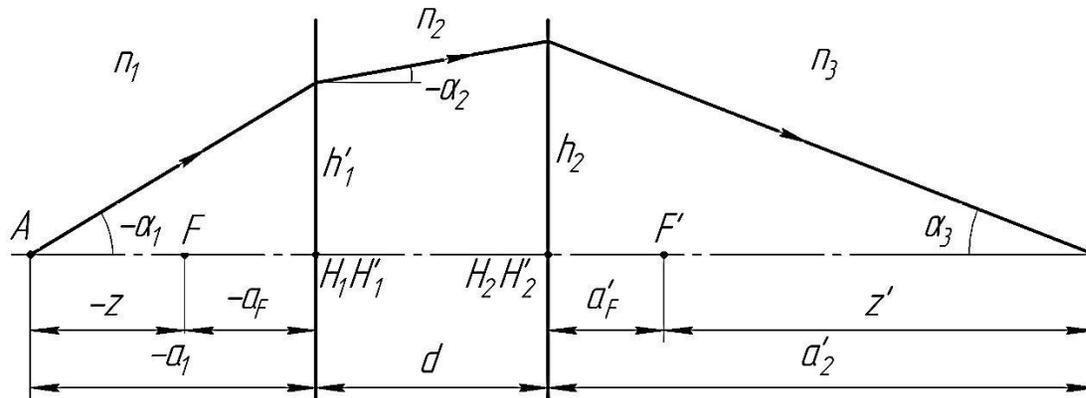


Рис. 5.6. Положение предмета и изображения в двухкомпонентной системе

Положение предмета и изображения относительно эквивалентных фокусов	$z = -\frac{f}{\beta} = \frac{f'}{\beta} \cdot \frac{n_1}{n_3} = \frac{n_1}{\beta\Phi}$ $z' = -\beta f' = -\beta \frac{n_3}{\Phi}$	5.38
Положение предмета и изображения относительно главных плоскостей	$a_1 = \frac{n_1}{\Phi} \left(\frac{1}{\beta} - 1 + \frac{\Phi_2}{n_2} d \right)$ $a'_2 = \frac{n_3}{\Phi} \left(1 - \beta - \frac{\Phi_1}{n_2} d \right)$ $\alpha_1 = \frac{n_3}{n_1} \beta \alpha_3$	5.39

6. ОГРАНИЧЕНИЕ ПУЧКОВ СВЕТА

6.1. Диафрагмы

В состав реальных систем входят линзы, зеркала, призмы и другие оптические детали, которые имеют конечные размеры и заключены в оправы. Оправы оптических деталей, а также специальные устройства, ограничивающие и изменяющие ширину пучков лучей, проходящих через оптическую систему, называются диафрагмами. В визуальных системах, действующих совместно с глазом, зрачок глаза также является диафрагмой, размер и положение которой учитывают при проектировании оптической системы. От размеров и положения диафрагм зависят важные характеристики оптического прибора: освещенность изображения и ее распределение по плоскости изображения; линейное или угловое поле зрения: разрешающая способность.

Апертурной диафрагмой (АД) является диафрагма, ограничивающая осевой пучок лучей, размер и положение которой влияют на освещенность изображения и определяют светосилу ОС (рис.6.1).

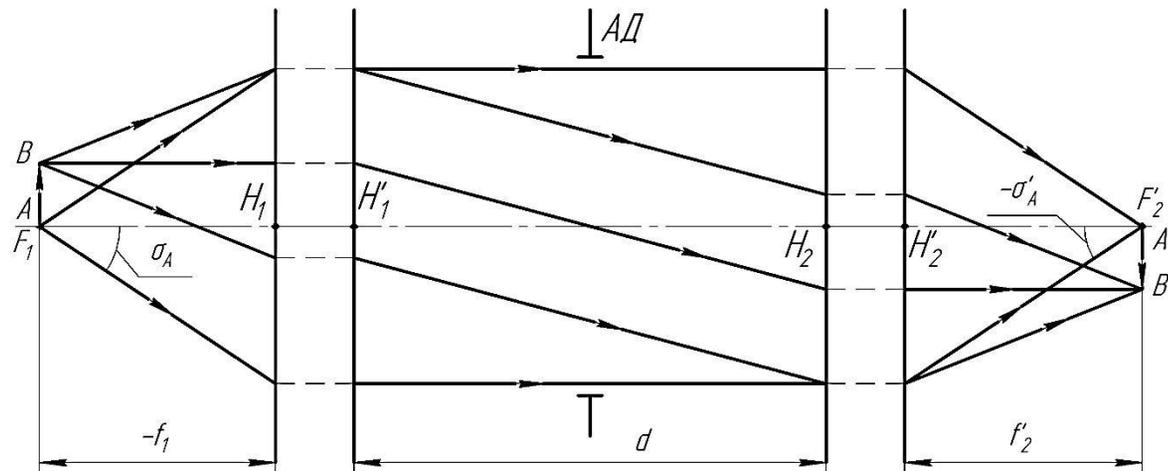


Рис. 6.1. Расположение АД в двухкомпонентной оборачивающей системе

Полевая диафрагма (ПД) – диафрагма, которая ограничивает размер изображаемой части пространства, т.е. поле системы.

Виньетирующая диафрагма – любая диафрагма, кроме апертурной и полевой, которая ограничивает наклонные пучки лучей.

Средний луч наклонного пучка проходит через центр апертурной диафрагмы и называется *главным лучом*. Если главный луч в пространстве предметов или пространстве изображений параллелен оптической оси, то ход пучка лучей, к которому относится этот главный луч, называется *телецентрическим*.

Значения переднего и заднего апертурного углов связаны через угловое γ или линейное увеличение β оптической системы (6.1), где n и n' – показатели в пространствах предметов и изображений соответственно.

Линейное увеличение системы	$\beta = \frac{n}{n'\gamma} = \frac{ntg\sigma_A}{n'tg\sigma'_A}$	6.1
Линейное увеличение в зрачках	$\beta_P = \frac{D'}{D}$	6.2
Относительное отверстие	D / f'	6.3
Диафрагменное число	$K = f' / D$	6.4
Передняя и задняя числовая апертура	$A = n / \sin\sigma_A$ $A' = n' / \sin\sigma'_A$	6.5

Входным зрачком оптической системы является параксиальное изображение АД в пространстве предметов или апертурная диафрагма, расположенная в этом пространстве.

Выходным зрачком называется параксиальное изображение АД в пространстве изображений или АД, расположенная в пространстве изображений. Входной, выходной зрачки и апертурная диафрагма сопряжены между собой. Входной и выходной зрачки видны из осевой точки предмета и изображения соответственно под наименьшим углом.

Абсолютное значение отношения диаметра входного зрачка к заднему фокусному расстоянию оптической системы называется *относительным отверстием*.

Величина, обратная относительному отверстию, называется *диафрагменным числом*.

Произведение показателя преломления в пространстве предметов на абсолютное значение синуса переднего апертурного угла $A = n / \sin \sigma_A$ называется числовой апертурой пространства предметов или *передней апертурой*. Аналогично $A' = n' / \sin \sigma'_A$ является числовой апертурой пространства изображений (*задней апертурой*).

6.2. Формула Гаусса для зрачков

На рис.6.2 показано расположение осевых точек A и A' предмета и его изображения, фокусов F и F' оптической системы и ее зрачков с центрами в точках P и P' .

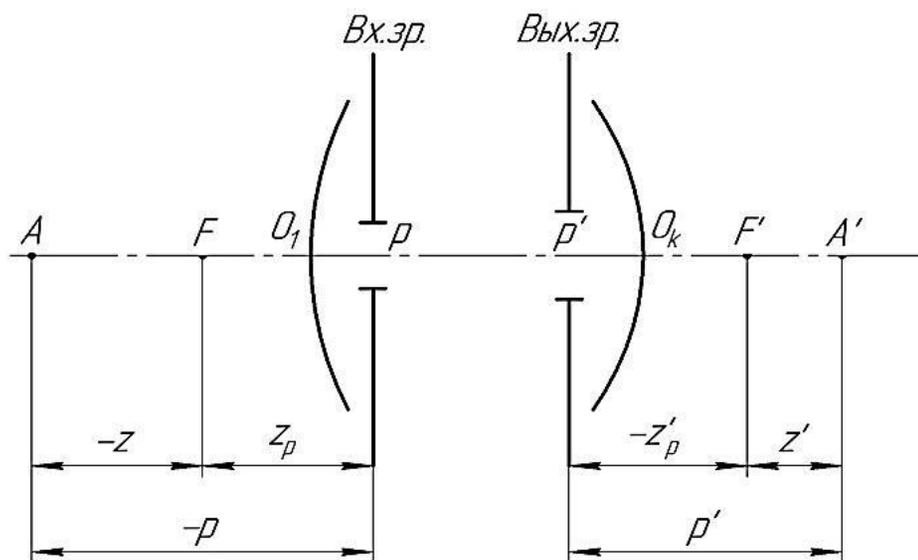


Рис 6.2. Расположение зрачков

Формулы удобны для практических расчетов, если известны линейные увеличения в зрачках β_p и всей системы β .

Формула Гаусса для зрачков	$\frac{\beta_p}{\rho'} - \frac{n}{\rho n' \beta_p} = \frac{1}{f'} \quad \Phi = \frac{n' \beta_p}{\rho'} - \frac{n}{\beta_p \rho}$	6.6
Положение предмета и изображения относительно зрачков	$\rho = z - z_p = f' \left(\frac{1}{\beta_p} - \frac{1}{\beta} \right) = \frac{n}{n'} \cdot \frac{\beta_p - \beta}{\beta \beta_p} f'$ $\rho' = z' - z_p' = f' (\beta_p - \beta)$	6.7
Угловое и линейное увеличение в зрачках	$tg\omega' = \gamma_p tg\omega = \frac{n}{n' \beta_p} \cdot tg\omega$	6.8

6.3. Методика определения апертурной диафрагмы

1. Для определения апертурной диафрагмы необходимо построить в пространстве предметов изображения всех диафрагм, расположенных внутри или после системы.
2. Та из диафрагм, которая находится перед системой, или то из изображений диафрагм, которое видно из осевой точки предметной плоскости под наименьшим углом, является входным зрачком оптической системы.
3. Материальная диафрагма, изображение которой есть входной зрачок, – это апертурная диафрагма, а ее изображение в пространстве изображений – выходной зрачок.

6.4. Полевая диафрагма. Поле зрения оптической системы

Полевая диафрагма ограничивает размер линейного поля системы в пространстве изображений. Она располагается в плоскости предмета или в одной из плоскостей действительного изображения, с ней сопряженной.

Линейным полем $2y$ оптической системы в пространстве предметов называется наибольший размер изображаемой части плоскости предмета, расположенной на конечном расстоянии. Аналогично, линейным полем $2y'$ в пространстве изображений называется наибольший размер изображения, лежащего на конечном расстоянии в оптической системе.

Угловым полем 2ω оптической системы в пространстве предметов называется абсолютное значение удвоенного угла между оптической осью и лучом в пространстве предметов, который проходит через центр апертур-

ной диафрагмы (входного зрачка) и край полевой диафрагмы. Угловое поле 2ω – угол между главными лучами в пространстве предметов.

Угловое поле $2\omega'$ – угол, образованный главными лучами, идущими в пространстве изображений. Между угловыми полями в пространствах предметов и изображений существует следующая зависимость:

$$tg\omega' = \gamma_p tg\omega = \frac{n}{n'\beta_p} tg\omega, \quad (6.8)$$

где γ_p, β_p – угловое и линейное увеличение системы в зрачках. Связь между линейными полями системы осуществляется линейным увеличением β ОС.

6.5. Геометрическое виньетирование

Виньетирующая диафрагма, не одинаково задерживая пучки лучей, идущих из осевой и внеосевой точек предмета, вызывает частичное диафрагмирование (срезание) наклонных пучков лучей, которое называется *геометрическим виньетированием*.

Угол поля зрения (виньетирование 100%; 50%; без виньетирования)	$tg\omega_3 = \frac{D_1 + D}{2l_2}$ $tg\omega_2 = \frac{D_1}{2l_2}$ $tg\omega_1 = \frac{D_1}{2l_2} - \frac{Dl_1}{l_1 + l_2}$	6.9
Начало и конец виньетирования	$y_1 = \frac{(l_1 + l_2) D_1 - l_1 D}{2l_2};$ $y_3 = \frac{(l_1 + l_2) D_1 + l_1 D}{2l_2}.$	6.10

Расстояния l_1 – относительно предметной плоскости; l_2 – относительно плоскости входного зрачка (подразумеваются абсолютные величины отрезков). Длины отрезков, взятые в формулах по абсолютной величине, означают, что виньетирующая диафрагма может находиться перед входным зрачком и за ним. D – диаметр входного зрачка; D_1 – диаметр виньетирующей диафрагмы. Вершина угла $2\omega_3$ не совпадает с центром входного

зрчка. Виньетирование, равное 50%, считается допустимым, поэтому угол $2\omega_2$ принимается за угловое поле в пространстве предметов.

Начало виньетирования характеризуется величиной $k_\omega = 1$, а конец виньетирования – $k_\omega = 0$.

В случае удаления предмета в бесконечность необходимо пользоваться формулами для начала и конца виньетирования в угловой мере:

$$\operatorname{tg}\omega_1 = \frac{D_1 - D}{2l_2}; \quad \operatorname{tg}\omega_3 = \frac{D_1 + D}{2l_2};$$

6.6. Коэффициенты виньетирования. Действующее отверстие входного зрчка

Виньетирование характеризуется двумя коэффициентами виньетирования:

а) по диаметру (линейным коэффициентом), равным отношению меридионального диаметра сечения наклонного пучка лучей $2m$ в плоскости входного зрчка к диаметру D входного зрчка: $k_\omega = \frac{2m}{D}$;

б) по площади, равным отношению площадей Q_ω и Q_o сечения наклонного и осевого пучков лучей во входном зрчке системы: $k_o = \frac{Q_\omega}{Q_o}$.

Чтобы определить размер меридионального сечения $2m$ для произвольной предметной точки A , расположенной между точками A_1 и A_3 , необходимо спроектировать диаметр виньетирующей диафрагмы на плоскость входного зрчка, считая точку A центром проекции (рис.6.3).

Действующим отверстием входного зрчка называется площадь входного зрчка, заполняемая лучами наклонного пучка, проходящими через оптическую систему. Действующую площадь входного зрчка вычисляют для построения диаграмм виньетирования наклонных пучков, идущих из определенной внеосевой точки предмета, и оценки виньетирования.

Для определения действующей площади входного зрчка для наклонных пучков при виньетировании необходимо:

– построить изображения в обратном ходе лучей всех диафрагм и экранов, расположенных внутри или за оптической системой в пространство предметов;

– спроецировать полученные изображения, находящиеся в пространстве предметов, в плоскость входного зрчка с центром проекции в заданной внеосевой точке предмета.

Для предметной плоскости, находящейся в бесконечности, проецирование производится прямыми линиями, параллельными главному лучу. Площадь, являющаяся общей площадью для всех проекций в плоскости входного зрачка, определяет действующую площадь входного зрачка для наклонного пучка лучей.

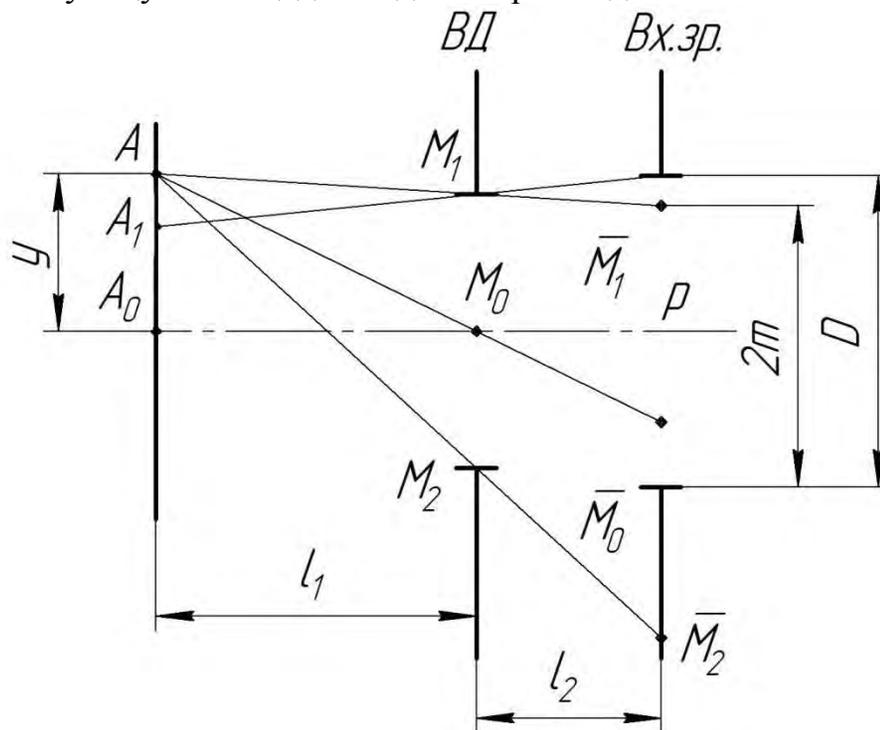


Рис 6.3. Картина виньетирования

<p>Коэффициенты виньетирования (по диаметру и по площади)</p>	$k_{\omega} = \frac{2m}{D};$ $k_o = \frac{Q_{\omega}}{Q_o}$	<p>6.11</p>
---	---	-------------

7. ПРОХОЖДЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

7.1. Энергетические величины

Поток излучения	$\Phi_e = \frac{dW_e}{dt}$	7.1
Сила излучения	$J_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	7.2
	$\Omega = \frac{Q}{r^2} \quad \Omega = \int_0^{\sigma_A} 2\pi \sin\sigma d\sigma = 2\pi(1 - \cos\sigma_A) \cong 4\pi \sin^2\left(\frac{\sigma_A}{2}\right)$	7.3
Энергетическая светимость	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dQ}$	7.4
Энергетическая освещенность	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dQ} \quad E_e = \frac{J_e}{d\Omega} = \frac{J_e}{r^2} \cos\Theta$	7.5
Энергетическая яркость	$L_e = \frac{dJ_e}{dQ \cos\Theta} \quad L_e = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dQ \cos\Theta} = \frac{dE_e}{d\Omega \cos\Theta}$	7.6
Энергетическая экспозиция	$H_e = \int_{t_1}^{t_2} E_{et} dt \quad E_{et} = const \quad H_e = E_e t$	7.7

Энергетические передаточные характеристики описывают передачу оптическим прибором энергии предмета. Поскольку через ОС проходят не все лучи, исходящие из предмета, а в самой системе происходят потери света на поглощение и отражение, освещенность изображения всегда ниже освещенности предмета.

Энергетические величины служат для количественной и качественной оценки всего диапазона оптического излучения. Определяющей характеристикой является средняя мощность, переносимая электромагнитным полем за единицу времени, которая называется *поток излучения* Φ . Поток излучения измеряется в ваттах (Вт).

7.2. Видимая область спектра. Световые величины

Для оценки действия излучения на глаз используют *световые величины*.

Световой поток – поток излучения, приведенный к чувствительности среднего глаза. Единицей светового потока принимается люмен (лм). Воздействие потока излучения с $\lambda = 555$ нм условно принимают за единицу; действие излучения на глаз других длин волн оценивается спектральной световой эффективностью излучения $v(\lambda)$. На рис. 7.1 приведены кривые относительной спектральной эффективности излучения $v(\lambda)$: 1 – для дневного зрения; 2 – для ночного зрения.

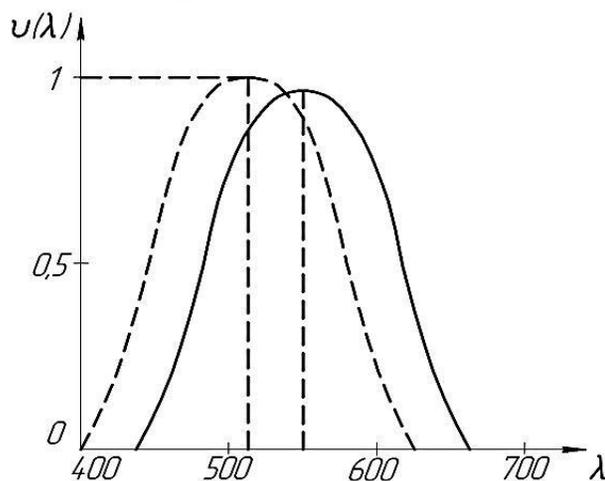


Рис.7.1. Кривые относительной спектральной эффективности излучения $v(\lambda)$ $\varphi_e(\lambda)$

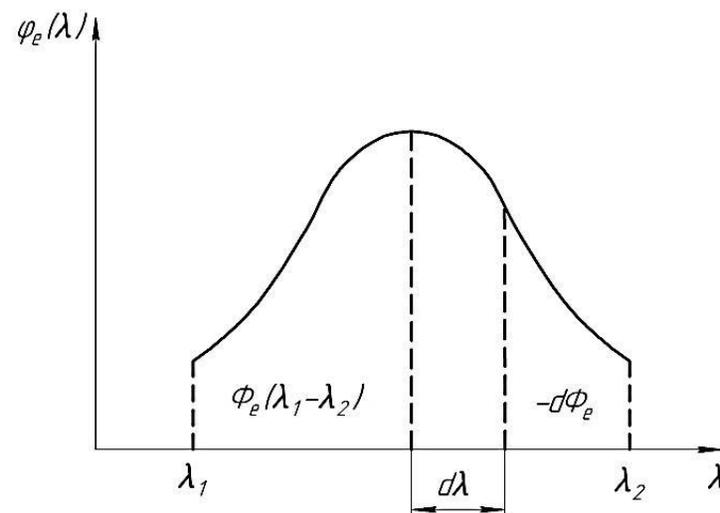


Рис.7.2. Спектральное распределение потока излучения $\varphi_e(\lambda)$

Световой поток монохроматического излучения с длиной волны λ рассчитывается по формуле

$$\Phi_{v,\lambda} = K_m \Phi_{e,\lambda} v(\lambda),$$

где K_m – коэффициент, характеризующий максимальное значение спектральной световой эффективности, называемый *световым эквивалентом* лучистого потока.

$K_m = 680 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$ (1 Вт потока монохроматического излучения $\lambda = 555$ нм равен 680 лм светового потока).

При оценке условий освещения прибегают к понятию светового потока, падающего на поверхность.

Поверхностная плотность потока излучения, падающего на поверхность площадью S , называется *освещенностью*, лк (1 люкс равен освещенности такой поверхности, на каждый квадратный метр которой равномерно падает поток в 1 люмен).

$$E = \frac{\Phi}{S}$$

Для характеристики самосветящихся источников света и поверхностей, которые пропускают или отражают падающий на них световой поток, используют поверхностную плотность излучаемого светового потока (*светимость M*).

Сила света J характеризует точечный источник света; это поток излучения, приходящийся на единицу телесного угла Ω , в пределах которого он распространяется, за направление силы света принимают ось телесного угла. Сила света измеряется в канделах.

$$J = \frac{\Phi}{\Omega}$$

Телесный угол в стерadianах (ср): $\Omega = \frac{S}{r^2}$, где S – площадь сферической поверхности с радиусом r .

Освещенность:

$$E = \frac{J}{r^2} \cos \theta.$$

Яркость – величина, характеризующая уровень светового ощущения или видимость элементов поверхности для протяженного источника. Для излучающей площадки S , перпендикулярной направлению излучения:

$$L = \frac{J}{S}$$

измеряется в $\text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$, зависит от угла θ между направлением излучения и нормалью к площадке:

$$L = \frac{J}{S \cos \theta}$$

Световой поток	$\Phi_v = K_m \int v(\lambda) \Phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda$ $\Phi_{v,\lambda} = K_m \Phi_{e,\lambda} v(\lambda)$	7.8
Световой эквивалент	$K_m = 680 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$	7.9
Механический эквивалент	$M = \frac{1}{K_m} = 0,00146 \text{ [Вт} \cdot \text{лм}^{-1}\text{]}.$	7.10
Спектральная световая эффективность с длиной волны λ	$K(\lambda) = \frac{\Phi_{v,\lambda}}{\Phi_{e,\lambda}} = K_m v(\lambda)$	7.11
Сила света	$J_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$	7.12
Освещенность	$E_v = \frac{d\Phi_v}{dQ}$	7.13
Светимость	$M_v = \frac{d\Phi_v}{dQ}$	7.14
Яркость	$L_v = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dQ \cos\Theta} = \frac{dJ_v}{dQ \cos\Theta} = \frac{dE_v}{d\Omega \cos\Theta}$	7.15
Закон Ламберта	$J_v = J_{max} \cos\Theta$	7.16

Светосила H определяется апертурой и коэффициентом спектрального пропускания. Характеризует способность прибора давать более или менее яркие изображения:

$$H = \frac{E}{L},$$

где L – яркость предмета, E – освещенность изображения.

Функция светораспределения характеризует равномерность освещенности по полю изображения.

7.3. Коэффициенты отражения, поглощения, рассеяния и пропускания

Коэффициент отражения	$\rho = \frac{d\Phi_{e,\rho}}{d\Phi_e};$	7.15
Коэффициент поглощения	$\alpha = \frac{d\Phi_{e,\alpha}}{d\Phi_e};$	7.16
Коэффициент рассеяния	$\sigma = \frac{d\Phi_{e,\sigma}}{d\Phi_e};$	7.17
Коэффициент пропускания	$\tau = \frac{d\Phi_{e,\tau}}{d\Phi_e}$	7.18
По закону сохранения энергии	$\rho + \alpha + \sigma + \tau = 1$	7.19
Интегральный коэффициент отражения	$\rho = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_e(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_e(\lambda) d\lambda},$	7.20

Поток излучения, падающей на оптическую систему, проходит через нее не весь; часть потока отражается от поверхностей ($d\Phi_{\rho,e}$), часть поглощается ($d\Phi_{\alpha,e}$) и рассеивается ($d\Phi_{\sigma,e}$) средами и только оставшаяся часть ($d\Phi_{\tau,e}$) проходит через оптическую систему. Для количественной оценки пользуются коэффициентами отражения ρ , поглощения α , рассеяния σ и пропускания τ .

Согласно закону сохранения энергии:

$$d\Phi_e = d\Phi_{e,\rho} + d\Phi_{e,\alpha} + d\Phi_{e,\sigma} + d\Phi_{e,\tau}.$$

7.4. Яркость отраженных и преломленных лучей, световые трубки

Световая трубка представлена на рис.7.3.

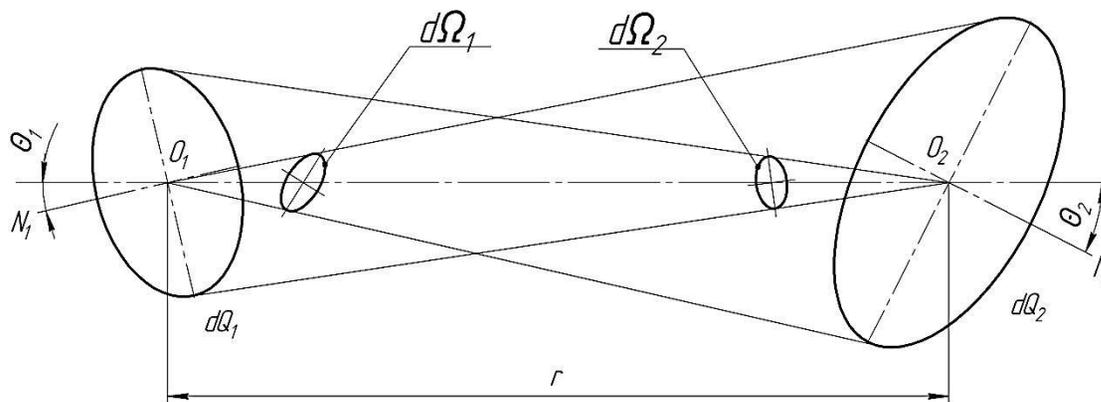


Рис.7.3.

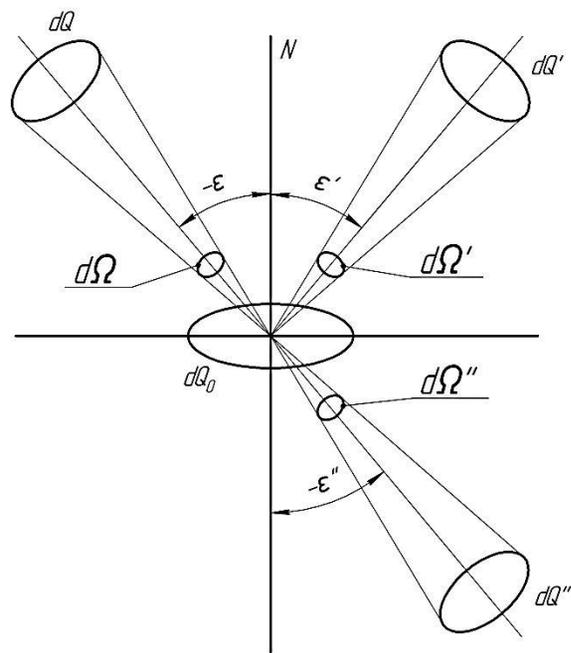
Телесный угол	$d\Omega_1 = \frac{dQ_2 \cos\Theta_2}{r^2}; \quad d\Omega_2 = \frac{dQ_1 \cos\Theta_1}{r^2}$	
Инвариант световой трубки для однородной среды	$dQ_1 d\Omega_1 \cos\Theta_1 = dQ_2 d\Omega_2 \cos\Theta_2$	7.21
Потоки излучения, проходящие через сечения dQ_1 и dQ_2	$d^2\Phi_{e1} = L_{e1} dQ_1 d\Omega_1 \cos\Theta_1; \quad d^2\Phi_{e2} = L_{e2} dQ_2 d\Omega_2 \cos\Theta_2$	7.22
Коэффициент пропускания, учитывающий потери на поглощение	$\tau_\alpha = 1 - \alpha$	
Яркость пучка	$L_e(1-\rho) = L_e'' \left(\frac{n}{n'}\right)^2$	7.23

Практическое значение элементарных световых трубок состоит в том, что их свойства можно перенести на трубки конечных размеров. Каждую световую трубку конечных размеров можно рассматривать как трубку, состоящую из бесконечно большого числа элементарных трубок.

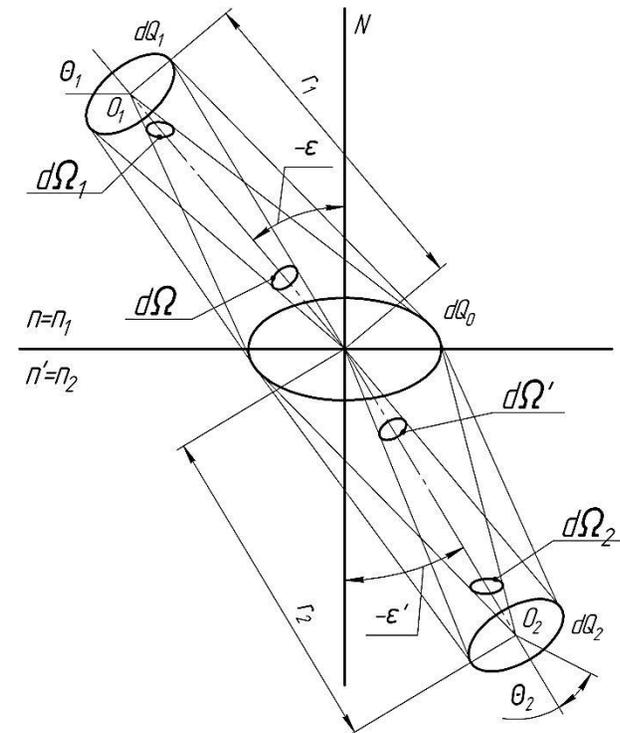
7.5. Инвариант Штраубеля

Инвариант Штраубеля описывает световые трубки, у которых площадки нормальны к оси трубки (рис.7.4).

Инвариант Штраубеля	$n_1^2 dQ_1 d\Omega_1 = n_k^2 dQ_k d\Omega'_k \quad \cos\Theta_1 = \cos\Theta'_k = 1$	7.24
---------------------	---	------



a)



б)

Рис.7.4

7.6. Коэффициент пропускания оптической системы

Яркость пучка после прохождения потока излучения через всю систему	$L'_{ep} = L_{e1} \left(\frac{n'_p}{n_1} \right) \prod_{k=1}^p (1 - \rho_k) \prod_{k=1}^p (1 - \alpha_k)^{d_k}$	7.25
--	--	------

Потери энергии в оптической системе характеризуются коэффициентом пропускания τ , для определения которого необходимо знать:

- коэффициенты отражения ρ от преломляющих поверхностей;
 - число преломляющих поверхностей системы, граничащих с воздухом и другими средами;
 - коэффициенты поглощения α оптических стекол и других материалов, из которых изготовлены оптические детали;
 - коэффициенты отражения ρ_3 для отражающих покрытий, если в системе имеются призмы и зеркала;
 - длину хода луча d_k вдоль оптической оси в каждой оптической детали, входящей в систему;
- типы светоделительных покрытий, если они имеются в оптической системе.

Коэффициент пропускания	$\tau = \prod_{k=1}^p (1 - \rho_k) \prod_{k=1}^{p-1} (1 - \alpha_k)^{d_k} \prod_{n=1}^{N_3} \rho_{zn} \prod_{q=1}^{N_c} \tau_{cq}$	7.26
-------------------------	--	------

Потери энергии вследствие отражения при преломлении в сложных оптических системах могут достигать больших величин (до 80 %). Их можно уменьшить путем просветления оптических деталей. Сущность просветления состоит в том, что на преломляющие поверхности наносят одно или несколько покрытий (пленок), обеспечивающих в результате интерференции резкое уменьшение отраженной части потока излучения.

Для отражающих поверхностей (зеркал) используют покрытия из алюминия, серебра, золота, родия и др. Для серебряных покрытий коэффициент отражения $\rho_3 = 0,94$; для алюминированных покрытий $\rho_3 = 0,87$. Для оптической системы, не имеющей просветляющих и светоделительных покрытий:

$$\tau = 0,95^{N_{кр}} \cdot 0,94^{N_{фл}} \cdot 0,99^a \cdot \rho^{N_3},$$

где $N_{кр}$ – число несклеенных поверхностей кронов; $N_{фл}$ – число несклеенных поверхностей флинтв; N_3 – число зеркальных поверхностей; a – суммарная толщина для всех стекол в сантиметрах вдоль оптической оси.

Оптическая плотность	$D(\lambda) = \lg \frac{1}{\tau_\alpha(\lambda)} = -\lg \tau_\alpha(\lambda)$	7.27
Коэффициент отражения от полированных поверхностей	$\rho = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\varepsilon - \varepsilon')}{\sin^2(\varepsilon + \varepsilon')} + \frac{\text{tg}^2(\varepsilon - \varepsilon')}{\text{tg}^2(\varepsilon + \varepsilon')} \right]$	7.28
Общий коэффициент пропускания	$\tau(\lambda) = (1 - \rho)^2 \tau_\alpha(\lambda)$	7.29
Оптическая плотность светофильтра с учетом потерь на отражение	$D(\lambda) = -\lg \tau_\alpha(\lambda) - 2 \lg(1 - \rho) = D(\lambda) + D(\rho)$	7.30

7.7. Световой поток, проходящий через оптическую систему

Элементарный световой поток $d\Phi_v$ идет от элемента dQ_0 , расположенного перпендикулярно оптической оси, и поступает в систему через бесконечно малый элемент входного зрачка (рис. 7.5).

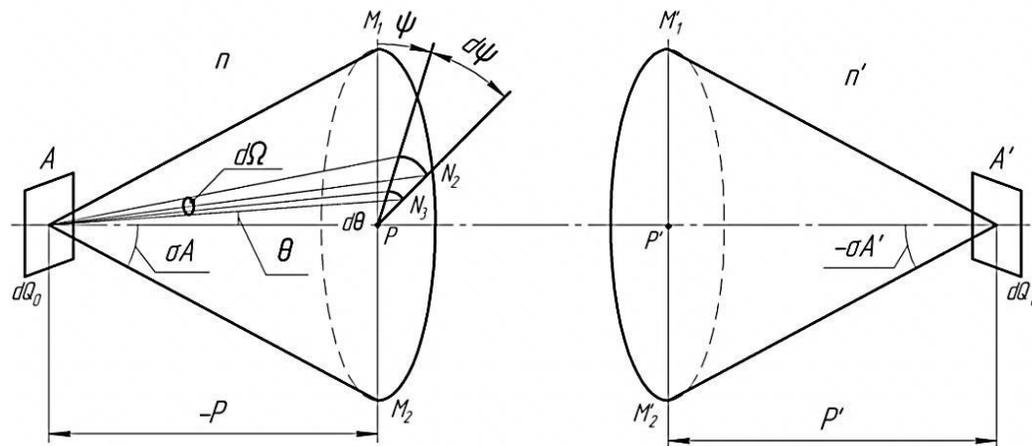


Рис.7.5

Элементарный телесный угол	$d\Omega = \frac{N_1 N_2 \cdot N_3 N_4}{\rho^2} = \frac{N_1 P \cdot d\Psi \cdot \rho d\Theta}{\rho^2} = \frac{\rho^2 \sin\Theta d\Psi d\Theta}{\rho^2} = \sin\Theta d\Theta d\Psi$	
Элементарный световой поток, поступающий в ОС	$d\Phi_v = L_v dQ_0 \int_0^{2\pi} d\Psi \int_0^{\sigma_A} \sin\Theta \cos\Theta d\Theta = \pi L_v dQ_0 \sin^2 \sigma_A$	7.31
Элементарный световой поток, вышедший из ОС	$d\Phi'_v = \pi \tau L_v \left(\frac{n'}{n}\right)^2 dQ_0 \sin^2 \sigma'_A$	7.32

Связь между яркостями характеризуется формулой

$$L'_v = L_v \tau \left(\frac{n'}{n}\right)^2,$$

где τ – общий коэффициент пропускания оптической системы.

Элементарный световой поток, выходящий из элемента dQ_1 , расположенного во внеосевой точке B .

Обычно допускают, что элементарные площадки равны $dQ_1 = dQ_0$ и яркость одинакова во всех точках $L_{1v} = L_v$. Считают, что поток заключен внутри телесного угла $d\Omega_1$ (рис. 7.6):

$$d^2\Phi_{\omega,v} = L_v dQ_0 \cos\Theta \cos\omega d\Omega_1 = L_v dQ_0 \cos^4 \omega \cos\Theta \sin\Theta d\Theta d\Psi.$$

Произведя интегрирование, получим $d\Phi_{\omega,v} = \pi L_v dQ \sin^2 \sigma_A \cos^4 \omega$.

Учитывая (7.32), имеем

$$d\Phi_{\omega,v} = d\Phi_v \cos^4 \omega.$$

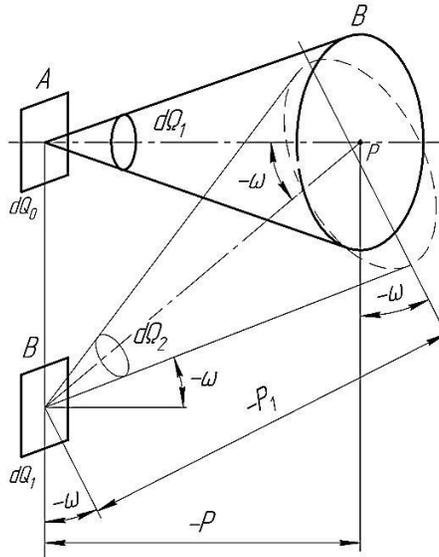


Рис.7.6

Расчетная формула для элементарного светового потока во внеосевой точке	$d\Phi_{\omega,v} = \pi L_v dQ \sin^2 \sigma_A \cos^4 \omega.$	7.33
Функция светораспределения	$d\Phi_{\omega,v} = d\Phi_v \cos^4 \omega.$	7.34

7.8. Освещенность изображения. Светосила

Освещенность элементарной площадки dQ_0 , расположенной на оптической оси, равна:

$$E_v' = \frac{d\Phi_v'}{dQ_0} = \frac{\tau d\Phi_v}{dQ_0}.$$

Задний апертурный угол оптической системы:

$$\sin \sigma'_A = \frac{D'}{2(z' - z'_p)}.$$

Отрезок Z' определяет положение плоскости изображения, отрезок Z'_p – положение плоскости выходного зрачка D относительно заднего фокуса системы.

Геометрическая светосила – квадрат относительного отверстия:

$$H_z = \left(\frac{D}{f'} \right)^2$$

Физическая (фактическая) светосила зависит от коэффициента пропускания ОС и представляет собой численную меру, характеризующую влияние конструкции системы на освещенность:

$$H_\phi = \tau H_z = \tau \left(\frac{D}{f'} \right)^2$$

Для предмета в бесконечности, линейное увеличение $\beta_0=0$, когда линейное увеличение в зрачках равно нулю:

$$E'_v = \frac{1}{4} \pi \tau L_v \left(\frac{D}{f'} \right)^2$$

Для изображения, расположенного на большом расстоянии ρ' от ОС:

$$\sin^2 \sigma'_A = \frac{D^2}{4\rho'^2} = \frac{Q_p}{\pi\rho'^2}$$

Для ОС, находящейся в однородной среде (формула Чиколева-Манжена):

$$E'_v = \tau L_v \frac{Q_p}{\rho'^2}$$

Освещенность на элементарной площадке, расположенной вне оптической оси, равна

$$E'_{\omega,v} = k_o E'_v \cos^4 \omega',$$

где k_o – коэффициент виньетирования в оптической системе.

Формула является приближенной и дает хорошие результаты для относительного отверстия

$$\frac{D}{f'} \leq 1:3$$

Линейное увеличение	$\beta_0^2 = \frac{dQ_0}{dQ_0}$	
Освещенность	$E'_v = \pi\tau L_v \left(\frac{r'}{n}\right)^2 \sin^2 \sigma'_A = \pi\tau L_v \frac{\sin^2 \sigma_A}{\beta_0^2}$	7.35
Освещенность изображения для предмета на бесконечности	$E'_v = \frac{1}{4} \pi\tau L_v \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \frac{\beta_{op}^2}{(\beta_{op} - \beta_0)^2} \left(\frac{r'}{n}\right)^2$ $\beta_0 = 0 \quad E'_v = \frac{1}{4} \pi\tau L_v \left(\frac{D}{f'}\right)^2$	7.36
Геометрическая светосила	$H_z = \left(\frac{D}{f'}\right)^2$	7.37
Фактическая светосила	$H_\phi = \tau H_z = \tau \left(\frac{D}{f'}\right)^2$	7.38
Задний апертурный угол	$\sin^2 \sigma'_A = \frac{D^2}{4\rho^2} = \frac{Q_\rho}{\pi\rho^2}$	
Формула Чиколева-Манжена	$E'_v = \tau L_v \frac{Q_\rho}{\rho^2}$	7.39
Освещенность площадки, расположенной вне оптической оси	$E'_{\omega,v} = k_O E'_v \cos^4 \omega'$	7.40

8. ВЫЧИСЛЕНИЕ ХОДА РЕАЛЬНЫХ ЛУЧЕЙ

8.1. Прохождение осевого пучка лучей через сферическую поверхность

Рассмотрим преломление осевого пучка, выходящего из точки A , через сферическую границу раздела двух сред с показателями преломления n и n' (рис.8.1).

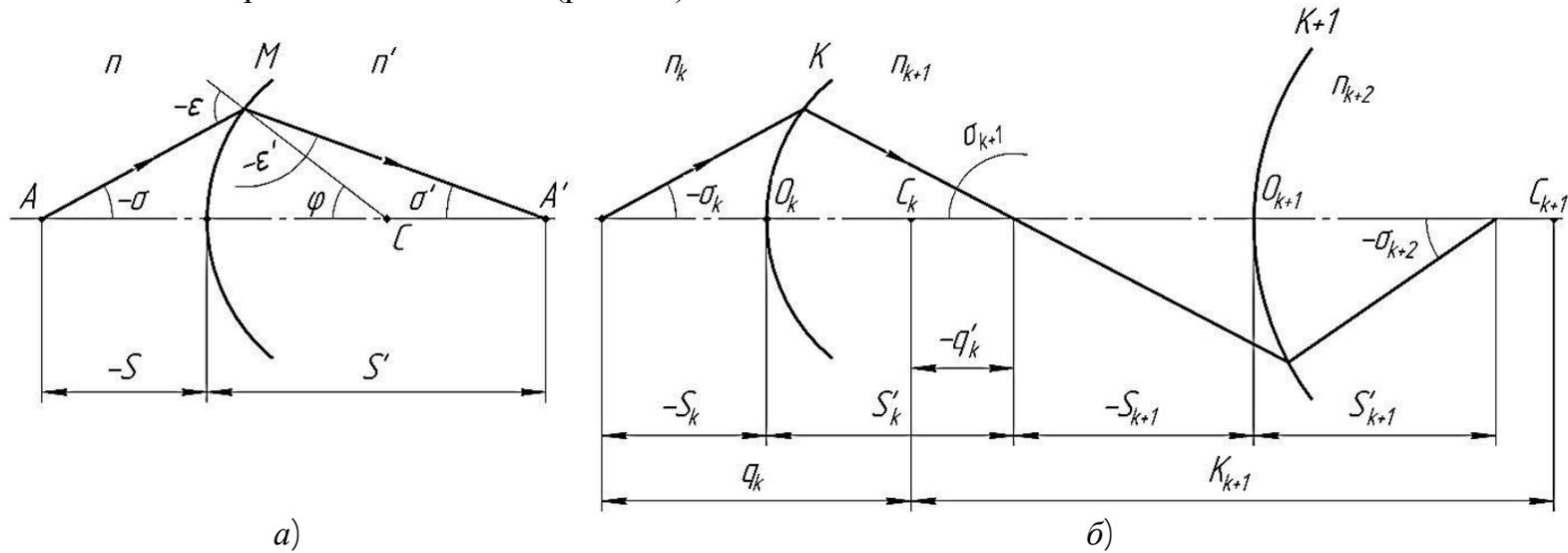


Рис.8.1: Преломление осевого луча а) через одну поверхность; б) через две поверхности

В общем случае, сферическая поверхность не сохраняет гомоцентричности осевого пучка после преломления и отражения (при $S = const$, S' является функцией апертурного угла σ). Исключением из этого является условие синусов, при выполнении которого $S' = const$:

$$\frac{\sin \sigma}{\sin \sigma'} = const$$

Задний отрезок	$S' = r - q \frac{\sin \sigma}{\sin \sigma'} \cdot \frac{n}{n'}$	8.1
Задний апертурный угол	$\sigma' = \sigma - \epsilon + \epsilon'$	8.2

Случай отражения	$n = -n$ $S' = r + q \frac{\sin \sigma}{\sin \sigma'}$ $\sigma' = \sigma + 2\varepsilon'$	<p>8.3</p> <p>8.2, а</p>
Условие синусов	$\frac{\sin \sigma}{\sin \sigma'} = \text{const}$	8.4

8.2. Апланатические точки

Для сферической преломляющей поверхности имеем три пары сопряженных точек, в которых выполняется условие синусов, т.е. не нарушается гомоцентричность пучка, преломленного сферической поверхностью. Эти точки называются *апланатическими*. Для зеркальных сферических поверхностей третья пара апланатических точек совпадает с первой. Условие (8.5) выполняется в трех случаях.

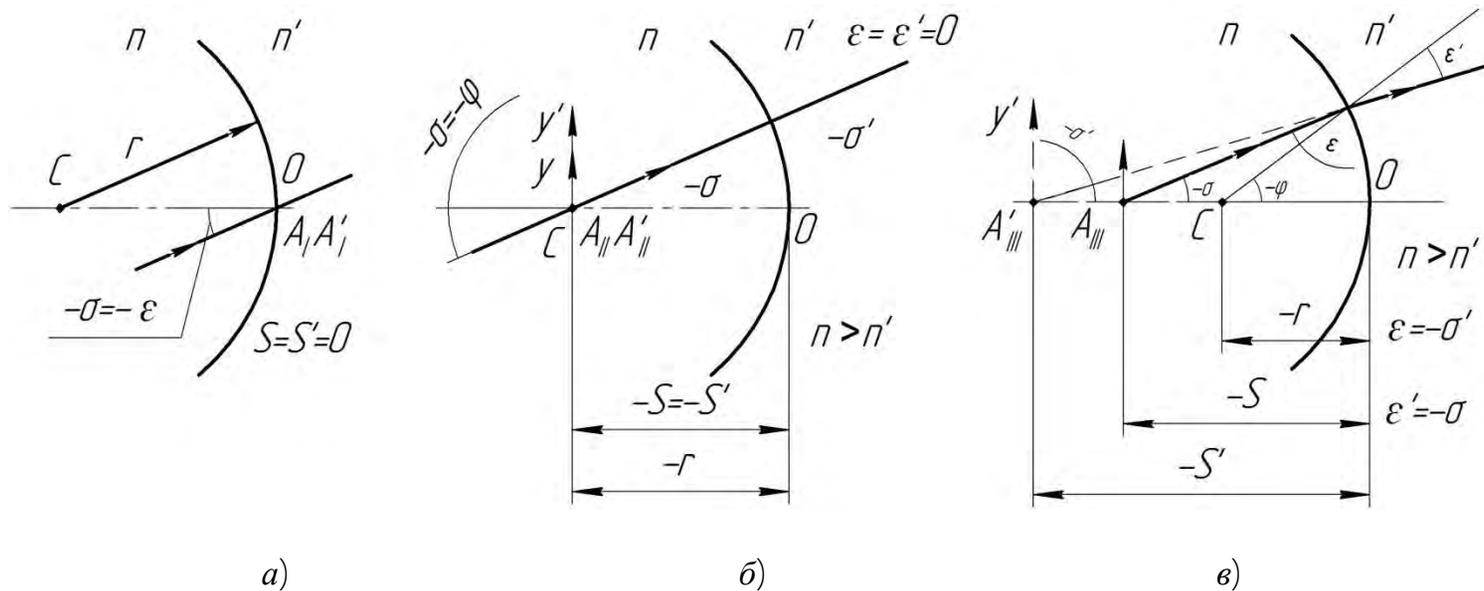


Рис.8.2. Расположение трех пар апланатических точек

Первая пара апланатических точек: <i>точки в вершине поверхности</i>	1. Если $\sigma = \varepsilon$, $S' = S = 0$	(рис. 8.2, 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. 8.2, б)
Третья пара апланатических точек	3. Если $\sigma = -\varepsilon'$, то $\sigma' = -\varepsilon$, $\frac{\sin \sigma}{\sin \sigma'} = \frac{n}{n'} = const.$ $S = r \frac{n+n'}{n} = r + r \frac{n'}{n}; \quad S' = r \frac{n+n'}{n'} = r + r \frac{n}{n'}$	(рис. 8.2, в)

8.3. Инварианты Аббе-Юнга

Элементарные осевые пучки являются параксиальными и образуют точечное (стигматическое) изображение предметной точки. Для предметной внеосевой точки B , главный луч элементарного наклонного пучка в общем случае не проходит через центр кривизны поверхности, поэтому элемент поверхности для этого пучка имеет различные радиусы кривизны в меридиональной и сагиттальной плоскостях $r_m \neq r_s$. Меридиональные и сагиттальные лучи пучка пересекутся с главным лучом в разных внеосевых точках B'_m и B'_s , не совпадающих с идеальным изображением B'_0 . Пучок лучей, образующий такого вида изображения, называется *астигматическим*. Положение изображений точек B'_m и B'_s находят путем расчета бесконечно тонких астигматических пучков через оптическую систему. Разница этих положений определяет астигматизм.

8.3.1. Меридиональный инвариант

Инвариант Аббе-Юнга для меридионального пучка лучей	$\frac{n' \cos^2 \varepsilon'}{t'_m} - \frac{n' \cos \varepsilon'}{r} = \frac{n \cos^2 \varepsilon}{t_m} - \frac{n \cos \varepsilon}{r}$	8.5
---	--	-----

8.3.2. Сагиттальный инвариант

Инвариант Аббе-Юнга для сагиттального пучка лучей	$\frac{n'}{t'_s} - \frac{n' \cos \epsilon'}{r} = \frac{n}{t_s} - \frac{n \cos \epsilon}{r}$	8.6
Обобщенная формула инварианта	$\frac{n' \cos^2 \epsilon'}{t'_m} - \frac{n \cos^2 \epsilon}{t_m} = \frac{n'}{t'_s} - \frac{n}{t_s} = \frac{n' \cos \epsilon' - n \cos \epsilon}{r}$	8.7
Фокусное расстояние в меридиональной и сагиттальной плоскости	$t'_m = f'_m = \frac{n' r \cos^2 \epsilon'}{n' \cos \epsilon' - n \cos \epsilon}; \quad t_s = f_s = \frac{n r}{n' \cos \epsilon' - n \cos \epsilon}$	8.8
Связь фокусных расстояний	$\frac{f'_m}{t'_m} + \frac{f_m}{t_m} = 1; \quad \frac{f'_s}{t'_s} + \frac{f_s}{t_s} = 1$	8.8, a

8.4. Анастигматические поверхности

Поверхность называется *анастигматической* при отсутствии астигматизма

Условие анастигматичности	$t_m = t_s = t, \quad t'_m = t'_s = t'$ $\frac{n'}{t'} = \frac{n' \cos \epsilon' - n \cos \epsilon}{r \cos^2 \epsilon'} + \frac{n \cos^2 \epsilon}{t \cos^2 \epsilon'} = \frac{n' \cos \epsilon' - n \cos \epsilon}{r} + \frac{n}{t}$	8.9
Формула инварианта	$nt = n't' = \frac{(n'^2 - n^2)r}{n' \cos \epsilon' - n \cos \epsilon}$	8.10
Случай отражения	$\cos \epsilon \left(\frac{1}{t'_m} + \frac{1}{t_m} \right) = \frac{1}{\cos \epsilon} \left(\frac{1}{t'_s} + \frac{1}{t_s} \right) = \frac{2}{r}$	8.11

8.5. 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 ω или линейный y).

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:

– 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. 8.3); 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.

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 $m_3 = m_4 \sqrt{0,75}$; $m_2 = m_4 \sqrt{0,5}$; $m_1 = m_4 \sqrt{0,25}$.

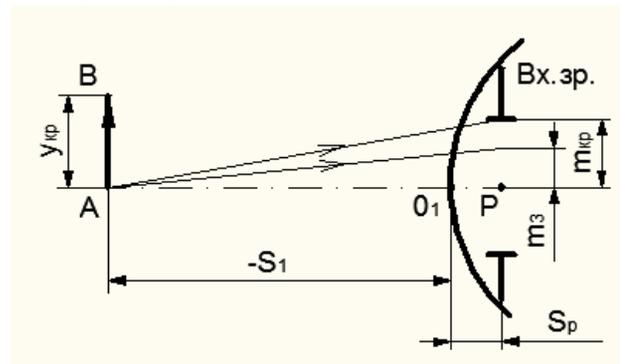


Рис. 8.3. Наборы лучей для расчета через ОС

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 ($y_3 = y_{кр}$; $y_2 = 0,707y_3$; $y_1 = 0,5y_3$).

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 ($M_3 = m_3$; $M_2 = m_2$; $M_1 = m_1$).

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:

$$m_i = m_{кр} \sqrt{\frac{i}{2}}.$$

Для четырех лучей ($N=4$, $m_{кр} = m_4$) получим:

$$m_3 = m_4 \sqrt{\frac{3}{4}}; \quad m_2 = m_4 \sqrt{\frac{1}{2}}; \quad m_1 = m_4 \sqrt{\frac{1}{4}}.$$

В наклонных (внеосевых) пучках ход лучей рассчитывают для одинаковых высот во входном зрачке, что и в осевом пучке. В меридиональной плоскости выбирают лучи, симметрично расположенные относительно главного луча ($m_{гл} = 0$): как вверх, так и вниз: $+m_3$, $+m_2$, $+m_1$, $m_{гл} = 0$, $-m_1$, $-m_2$, $-m_3$.

9. АБЕРРАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

9.1. Монохроматические aberrации 3-го порядка

9.1.1. Геометрический смысл aberrаций

Гомоцентрический пучок лучей, прошедший через ОС, сохраняет гомоцентричность только в пределах узкой параксиальной области. Оптических систем, которые давали бы стигматические изображения независимо от размеров предмета, за исключением плоских зеркал, в природе не существует.

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, называются геометрическими *aberrациями* (ошибками или погрешностями) для определенной длины волны. Aberrации являются критерием оценки, по которому можно судить о степени приближения реальной к ИОС.

На рис.9.1 $X A_0 Y$ и $X' A'_0 Y'$ – плоскости предмета и изображения; $\bar{X} P \bar{Y}$ и $\bar{X}' P' \bar{Y}'$ – плоскости входного и выходного зрачков; $A_0 B_0 = y$ – величина предмета; $A'_0 B'_0 = y'_0$ – гауссово изображение предмета; S, S_p – положения плоскостей предметов и входного зрачка относительно вершины первой поверхности; S', S'_p – расстояния до плоскости изображения и выходного зрачка от вершины последней поверхности ОС.

В ИОС любой луч, вышедший из точки B_0 , попадает в точку B'_0 ; величина изображения $y'_0 = y \cdot \beta_0$, где β_0 – линейное увеличение системы в области Гаусса.

Реальный луч BQ , имеющий на плоскости входного зрачка координаты m и M , пройдя через ОС, в плоскости выходного зрачка в точке Q имеет координаты m' и M' , плоскость Гаусса пересекает в некоторой точке B'_0 .

Отрезок $B'_0 B$ – *геометрическая aberrация*. Рассматривают проекции геометрической aberrации на меридиональную плоскость δy и сагиттальную δx . Координаты точки B : $y'_0 + \delta y$ и δx .

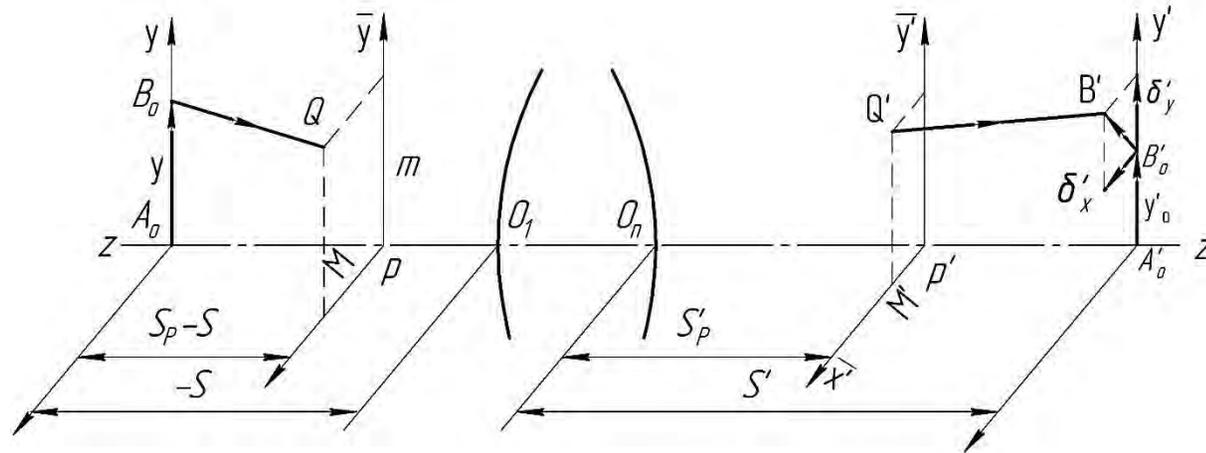


Рис.9.1. Прохождение реального луча через систему

Разложение aberrаций, выполненное Зейделем, выполнено при условии ограничения двумя членами в разложении тригонометрических функций ($\delta y'$ и $\delta x'$ – меридиональная и сагиттальная составляющие aberrаций; m' и M' – координаты пересечения луча с плоскостью выходного зрачка; y – величина предмета.

A , B , C , D и E – коэффициенты, зависящие от конструктивных элементов системы (r , d , n), а также от положения предмета S и входного зрачка S_p .

Разложение Зейделя	$\delta y' = m'(m'^2 + M'^2)A + (3m'^2 + M'^2)yB + m'y^2C + y^3E;$ $\delta x' = M'(M'^2 + m'^2)A + 2M'm'yB + M'y^2D,$	9.1
--------------------	---	-----

9.1.2. Сферическая aberrация

Сферическая aberrация – нарушение гомоцентричности прошедших через оптическую систему широких пучков лучей, выходящих из точек 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 парааксиального изображения называется *поперечной сферической aberrацией* $\delta y' = \Delta S' \operatorname{tg} \sigma'_A$. Размер кружка рассеяния зависит от положения плоскости установки.

Меридиональная и сагиттальная составляющие	$\delta y'_{cf} = r^3 \cos\theta A;$ $\delta x'_{cf} = r^3 \sin\theta A.$	9.2
Фигура рассеяния – окружность	$(\delta y'_{cf})^2 + (\delta x'_{cf})^2 = (Ar^3)^2 = R^2_{cf}.$	9.3
Продольная сферическая aberrация	$\Delta S' = S' - S'_0$	9.4
Поперечная сферическая aberrация	$\delta y' = \Delta S' \operatorname{tg}\sigma'_A$	9.5

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: $\Delta = \frac{3}{4} \Delta S'_{кр}$.

$\Delta S'_{кр}$ – сферическая aberrация для лучей, идущих через край входного зрачка.

9.1.3. Кома

При наличии комы лучи, заполняющие входной зрачок, в плоскости Гаусса образуют фигуру, напоминающую комету, которая ограничена двумя прямыми, образующими угол 60° , и полуокружностью. Радиус кружка рассеяния R_K пропорционален второй степени m' и первой y . Направление «хвоста» фигуры рассеяния определяется знаком коэффициента B .

Меридиональная и сагиттальная составляющие	$\delta y'_k = (3m'^2 + M'^2)yB;$ $\delta x'_k = 2M'm'yB.$	9.6
Фигура рассеяния	$(\delta y'_k - 2r^2 yB)^2 + \delta x'^2_k = (r^2 yB)^2 = R_K^2$	9.7
Величина меридиональной комы	$\delta y'_k = \frac{y'_{m'} + y'_{-m'}}{2} - y'_{2l}$	9.8

Кома – нарушение симметрии прошедшего через ОС широкого наклонного пучка лучей, выходящих из внеосевых точек предмета. Симметрия сохраняется лишь относительно меридиональной плоскости, где кома вычисляется путем расчета хода реальных лучей по формуле (9.8).

Объективы, в которых исправлены сферическая аберрация и кома, называются *апланатами*.

9.1.4. Астигматизм и кривизна поверхности изображения

Наличие аберраций астигматизма и кривизны поверхности изображения определено тем, что изображение предмета, даваемое бесконечно узкими пучками лучей, лежит не на плоскости, а на искривленных поверхностях (параболоидах), причем кривизны этих поверхностей различны для меридиональной и сагиттальной плоскостей.

Меридиональная и сагиттальная составляющие астигматизма	$z'_m = y^2 (s'_p - s'_0) C;$ $z'_s = y^2 (s'_p - s'_0) D.$	9.9
Величина продольного астигматизма	$z'_s - z'_m = y^2 (s'_p - s'_0) (D - C)$	9.10
Фигура рассеяния	$\left(\frac{\delta y'_m}{ry^2 C} \right)^2 + \left(\frac{\delta x'_s}{ry^2 D} \right)^2 = 1$	9.11

Если луч в плоскости выходного зрачка описывает окружность, то в плоскости Гаусса он описывает эллипс с полуосями, равными $ry^2 C$ и $ry^2 D$. В некоторых плоскостях установки эллипс вырождается в окружность или прямые линии. Наличие астигматизма и кривизны изображения вызывает нерезкость по краям поля зрения. ОС с устраненным астигматизмом называются *анастигматами*.

Астигматизм опасен в широкоугольных системах, так как X'_m, X'_s и полуоси эллипса пропорциональны второй степени величины предмета (в линейной – y^2 или угловой – ω^2 мере).

9.1.5. Дисторсия

Дисторсия – нарушение подобия между предметом и изображением, создаваемым оптической системой вследствие непостоянства линейного увеличения в ней для различных величин предмета. Изменение линейного увеличения в реальных системах вызывается следующими причинами: сферической aberrацией в зрачках и неравенству единице углового увеличения в зрачках.

Дисторсия определяется коэффициентом E , который входит только в меридиональную составляющую разложения (9.1). Весь пучок смещается на величину $\delta y'_d$, но его гомоцентричность не нарушается.

$$\delta y'_d = y^3 E. \quad (9.12)$$

Абсолютная величина дисторсии	$\Delta y' = y' - y'_0$	9.13
Относительная величина дисторсии	$\Delta = \frac{\Delta y'}{y'_0} \cdot 100\%$	9.14

При наличии дисторсии все лучи широкого внеосевого пучка лучей собираются в одной точке, но ее координаты не совпадают с гауссовым изображением. Дисторсия велика и опасна в широкоугольных системах: пропорциональна третьей степени величины предмета y^3 (полевого угла ω^3). Дисторсия недопустима в измерительных системах, объективах для аэрофотосъемки и картографии, в системах для репродукции и фотолитографии. Оптическая система, свободная от дисторсии, называется *ортоскопической*.

Формула Кольшуттера. Если ограничиться не слишком большими полями ($20 \dots 40^\circ$) и относительными отверстиями (1:4...1:5), то координаты пересечения лучей с плоскостью Гаусса достаточно точно описываются разложением aberrаций 3-го порядка (9.1). В области Зейделя присутствуют пять монохроматических aberrаций: сферическая, кома, астигматизм, кривизна поверхности и дисторсия.

Формула Кольшуттера определяет число aberrаций в зависимости от их порядка:

$$N = \frac{(t+1)(t+7)}{8},$$

где N – число aberrаций; t – порядок aberrаций. Например, если $t = 3$, то $N = 5$; если $t = 5$, то $N = 9$ и т.д.

Число aberrаций	$N = \frac{(t+1)(t+7)}{8}$	9.15
-----------------	----------------------------	------

9.2. Хроматические aberrации 1-го порядка

В отличие от монохроматических *хроматические aberrации* появляются уже в параксиальной области. Это следует из рассмотрения инвариантов Аббе и Гюйгенса-Гельмгольца для параксиальной области.

9.2.1. Хроматизм положения

Хроматизм положения	$dS' = S'_F - S'_C$ $dS' = -\frac{f'}{v}, \text{ если } S_1 = \infty$ $dS' = -\frac{S'^2}{fv}, \text{ если } S_1 \neq \infty$	9.16
Условие ахроматизации	$dS' = \sum \frac{\Phi}{v} = 0$	9.17
Величина вторичного спектра	$dS'_{B.C.} = f' \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{v_2 - v_1}, \quad v = \frac{n_e - 1}{n_F - n_C}, \quad \gamma = \frac{n_F - n_e}{n_F - n_C}$	9.18

Для простой линзы *хроматизм положения* исправить невозможно. У положительной линзы хроматизм положения отрицательный, а у отрицательной линзы – положительный. Хроматизм положения не зависит от формы линзы, а зависит только от ее фокусного расстояния и коэффициента дисперсии.

Для устранения (исправления) хроматизма положения необходимо использовать (соединить) по крайней мере одну положительную и одну отрицательную линзы из различных марок стекла.

Геометрическое место точек пересечения лучей различных длин волн с оптической осью называется *спектром*.

Для системы, у которой в одной точке соединены лучи двух длин волн (исправлен хроматизма положения), спектр имеет вид, изображенный на рис.9.2, б. Такие системы называются *ахроматами*. Для визуальных систем обычно соединяют красный и синий лучи (спектральные линии C и F),

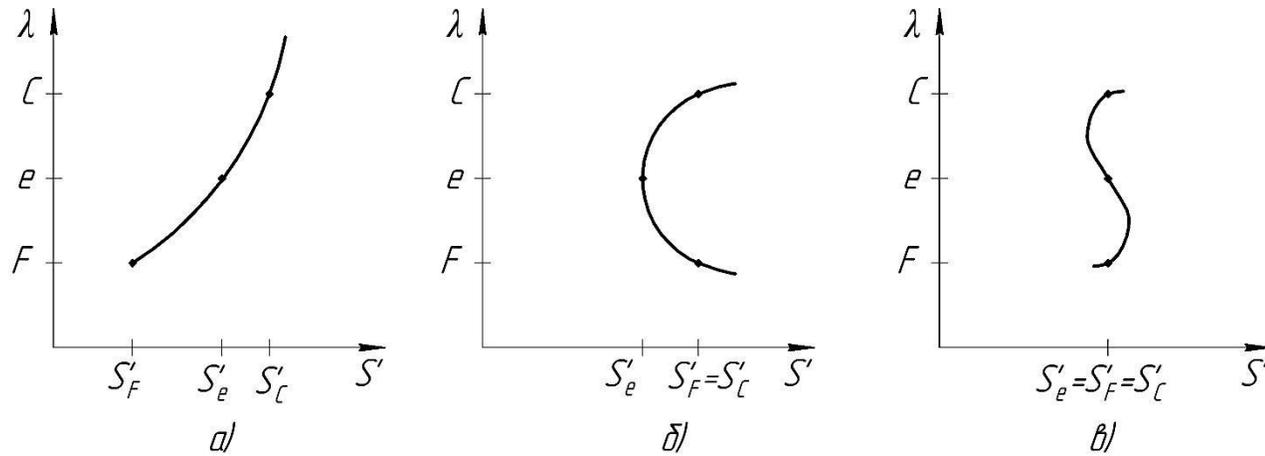


Рис.9.2. Спектры оптических систем: а) простой линзы; б) системы-ахромата; в) системы-апохромата.

Для двухлинзового объектива величина вторичного спектра может быть вычислена по формуле (9.18). Если в объективе, склеенном из двух линз, применены обычные марки стекол, то

$$dS'_{B.C.} \approx \frac{1}{2000} f'. \quad (9.19)$$

Системы с исправленным вторичным спектром называются *апохроматами* (рис.9.2, в), которые дают практически бесцветное изображение. Коррекция вторичного спектра достигается путем использования в качестве оптических сред линз из кристаллов, например, флюорита (CaF_2), фтористого лития (LiF) и особых марок стекол, как ОФ4, СТК9, ТБФ, которые имеют особый ход относительных частных дисперсий. Оптические системы, у которых к одной точке сведены лучи более трех длин волн, называются *суперапохроматами*.

9.2.2. Хроматизм увеличения

Аберрация проявляется в виде цветного ореола по краям изображения, который снижает контраст и качество изображения.

Хроматическая разность увеличения	$dy = y_F - y_C$	9.20
Относительная величина	$\frac{dy}{y} 100\%$	9.21
Для одиночной линзы хроматизм увеличения	$\frac{dy}{y} = \frac{a_p}{fv} 100\%$, если $S = \infty$; $\frac{dy}{y} = -\frac{Sa_p}{(S_p - S)} \frac{100\%}{fv}$, если $S \neq \infty$.	9.22

Для одиночной линзы хроматизм увеличения может быть вычислен по формуле

$$\frac{dy}{y} = \frac{a_p}{fv} 100\%, \text{ если } S = \infty;$$

9.3. Выражение аберраций ОС через аберрации ее компонентов

Расчет ОС делится на 2 основных этапа – габаритный и аберрационный.

При габаритном расчете ОС разбивается на отдельные составные части (объектив, окуляр, оборачивающая система и др.), для которых определяются *оптические характеристики и параксиальные элементы*:

- относительное отверстие,
- линейное или угловое поле зрения,
- положение зрачков,
- коэффициент виньетирования,
- величины допустимых остаточных аберраций и т.д.

Для ОС, обладающих небольшой светосилой и малыми угловыми полями, aberrации отдельных компонентов можно переносить в сопряженные плоскости изображений других компонентов по правилу сложения aberrаций 3-го порядка:

- поперечные aberrации умножаются на линейное увеличение β переносимой части;
- продольные – на β^2 тех компонентов, через которые переносятся aberrации.

9.3.1. Формулы для вычисления aberrаций системы после окуляров визуальных приборов

Aberrации окуляров визуальных систем рассчитывают в обратном ходе для линейного изображения.

Поперечные aberrации – отклонения координат точки пересечения реального луча с плоскостью изображения от координат точки идеального изображения в направлении перпендикулярном оптической оси:

$\Delta \bar{g}'_{ок}$ – поперечная aberrация окуляра, вычисленная в обратном ходе (в его передней фокальной плоскости),

$\Delta g'_1$ – поперечная aberrация ОС (к примеру, объектива), вычисленная в прямом ходе,

$\Sigma = \Delta g'_1 - \Delta \bar{g}'_{ок}$ – суммарная aberrация в передней фокальной плоскости окуляра.

Суммарная aberrация за окуляром, имеющем фокусное расстояние $f'_{ок}$ рассчитывается в угловой мере ($\Delta \omega'$ – угловая aberrация в мин.):

$$\Delta \omega' = \frac{\Delta g'_1 - \Delta \bar{g}'_{ок}}{f'_{ок}} \quad (9.23)$$

Продольные aberrации – отклонение координаты точки пересечения реального луча с осью от координаты точки идеального изображения вдоль оси. Их принято определять за окуляром в диоптрийной мере (\bar{L}).

К этим aberrациям относят:

Aberrации осевого пучка

– продольную сферическую aberrацию окуляра, вычисленную в обратном ходе (в его передней фокальной плоскости),

– продольную сферическую aberrацию ОС (к примеру, объектива), вычисленную в прямом ходе.

Продольные aberrации, не зависящие от апертуры: кривизна, астигматизм, хроматизм положения и др.

Для продольной сферической aberrации:

$$\bar{L} = \frac{\Delta S' + \overline{\Delta S'_{ок}}}{f'_{ок}{}^2 / 1000} \quad (9.24)$$

Остальные aberrации аналогично.

Величина продольной aberrации в передней фокальной плоскости окуляра, соответствующая *продольной aberrации в пространстве изображений в 1 диоптрию* в пространстве изображений (в бесконечности):

$$\Delta Z_{ок} = \frac{f'_{ок}{}^2}{1000} \quad (9.25)$$

Формула справедлива для положительных окуляров.

9.3.2. Допустимые значения остаточных aberrаций в различных оптических системах

Полного исправления всех aberrаций достигнуть невозможно. В технических заданиях (ТЗ) даются цифры по остаточной коррекции aberrаций, их допустимых значений.

Разрешающая способность визуальных ОС. В визуальных приборах приемником излучения является глаз. Для глаза принимается угловой предел разрешения $\psi_{гл} = 1'$ при абсолютном контрасте $k=1$ в пределах углового поля $2\omega = 2^\circ$. При понижении контраста изображения в зависимости от яркости фона угловой предел разрешения глаза резко снижается.

Для *телескопических систем* контраст наблюдаемых предметов колеблется в пределах $k=0,2-0,8$, при этом разрешающая способность глаза $\psi_{гл} = 2,5-1,5'$.

В *микроскопах* контраст наблюдаемых объектов еще ниже, поэтому $\psi_{гл} = 3-4'$ при зрачке глаза размером $D_{зр.гл} = 2-3$ мм. Если учесть, что при наблюдении в микроскоп размер его выходного зрачка $D' \leq 0,5-1$ мм, то $\psi_{гл}$ понижается вдвое (6–10').

Значения среднего приращения разрешаемого глазом угла в угловых секундах на 1' любой aberrации: хроматизм – 3"; кома – 5"; астигматизм и дефокусировка 12".

Значения aberrаций реальных приборов.

1. Бинокли, геодезические приборы:

- сферическая aberrация: 1–2', с учетом хроматизма: 2–3',
- относительный хроматизм увеличения: 0,5–1 %;
- поперечная aberrация внеосевых пучков: 5–10' (из них 2–3' – кома).

По ГОСТу на бинокли разрешающая способность телескопической системы для точки на оси определяется диаметром выходного зрачка. Так, для диаметра зрачка до 5 мм она равна $120''/D$, а свыше 5 мм $-300''/D$.

2. Сложные телескопические системы (дальномеры, морские прицелы):

– сферическая aberrация – (20' max);

– допускаемые значения кривизны изображения и астигматизма, дисторсии зависят от угловых полей.

3. Окуляры:

– обычные окуляры: астигматизм и кривизна 3–4 дптр, дисторсия: 4–7 %;

– широкоугольные окуляры: астигматизм и кривизна 5–6 дптр, дисторсия 10 %.

4. Микроскопы (aberrации за окуляром допускают больше, чем в телескопических):

– для точки на оси 10–15';

– кривизна и астигматизм в микрообъективах (обычных $\beta = 40^x$):

0,5–3 мм, в ахроматах 1,2–3 мм; апохроматах 2 мм.

–дисторсия 1,5 – 2 %.

5. Фотообъективы (оцениваются предельно допустимые размеры пятен рассеяния):

0,03–0,05 мм – для снимков без увеличения;

0,01–0,03 мм – для снимков с последующим увеличением.

В проекционных объективах допускаемые остаточные aberrации примерно такие же, как в фотообъективах.

6. Линзовые конденсоры дают хорошие распределения светового потока, если диаметр наименьшего пятна рассеяния не превышает 3–10% размера изображения источника. В неотвеченных конденсорах этот параметр допускается до 30%.

7. Допускаемые значения остаточных aberrаций объективов различных следящих фотоэлектрических устройств, определяемые размерами допускаемых пятен рассеяния, оценивают в угловой мере:

$$\Delta\sigma' = \frac{(2y')_{дон}}{f} \cdot 1000 \text{ (в млирад),}$$

$(2y')_{дон}$ – допускаемый размер пятна рассеяния; f – фокусное расстояние объектива фотоэлектрического прибора.

8. В астрономических приборах допустима дисторсии 0.1%.

РАЗДЕЛ 2. ТИПОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

10. ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

10.1. Оптические характеристики

Простые зрительные трубы состоят из двух компонентов: объектива и окуляра. Параллельный пучок лучей, попавший в телескопическую систему, выходит из нее параллельным, поэтому задний фокус объектива совмещен с передним фокусом окуляра; *оптический интервал* Δ (расстояние между точкой F'_1 заднего фокуса объектива и точкой F_2 переднего фокуса окуляра) равен нулю: $\Delta = 0$.

Сложная телескопическая система, кроме двух основных составляющих – объектива и окуляра, может иметь другие оптические детали: защитные стекла, сетки, призмы, оборачивающие и фокусирующие системы, светофильтры и др. Конструктивно эти детали могут быть отнесены как к объективной, так и к окулярной части.

Основными характеристиками телескопической системы являются: видимое увеличение Γ_T , угловое поле 2ω , диаметр выходного зрачка D .

Другими важными характеристиками являются: длина системы, удаление выходного зрачка d'_p (или от последней поверхности окуляра S'_p), коэффициент виньетирования K_ω , разрешающая способность Ψ .

Числовая апертура в пространстве предметов равна нулю $A = n \cdot \sin|\sigma_A| = 0$.

Видимое увеличение	$\Gamma = \frac{tg \omega'}{tg \omega} = \frac{-f'_1}{f'_2} = \frac{D}{D'}$	10.1
Фокусное расстояние объектива и окуляра телескопической системы	$f'_{об} = \frac{L \cdot \Gamma}{\Gamma - 1}$	10.2
	$f'_{ок} = \frac{L}{1 - \Gamma}$	10.3

Для телескопической системы видимое Γ_T , линейное β , угловое γ и продольное α увеличения являются постоянными величинами, не зависящими от положения предмета:

$$\beta = \frac{n}{n'\Gamma_T} = const; \quad \gamma = \Gamma_T = \frac{tg\omega'}{tg\omega} = const; \quad \alpha = \frac{n}{n'\Gamma_T^2} = const \quad (10.4)$$

Визуальная телескопическая система работает непосредственно с глазом наблюдателя. Для устранения напряжения аккомодации необходимо, чтобы изображение находилось на бесконечности. Выходящие пучки лучей параллельны, т.е. *числовая апертура в пространстве изображений* также равна нулю $A' = n' \cdot \sin|\sigma_A'| = 0$.

В системах с таким ходом лучей эквивалентное фокусное расстояние равно бесконечности, а оптическая сила равна нулю; они также называются *афокальными*.

10.2. Объективы и окуляры телескопических систем

Поле зрения характеризует величину изображаемого пространства. Поле зрения трубы обычно рассчитывают, исходя из поля зрения, обеспечиваемого окуляром.

В окулярах Кельнера и симметричных окулярах поле зрения порядка $2\omega' = 40\text{--}50^\circ$, в более сложных окулярах: $60\text{--}90^\circ$.

Диаметр выходного зрачка при наблюдении предметов конечных размеров равен зрачку глаза (или несколько больше), обеспечивая высокую субъективную яркость.

Наиболее распространены: двухлинзовые склеенные объективы; их применяют в качестве объективов и оборачивающих систем, когда падающие пучки параллельны.

Двухлинзовый объектив (рис. 10.1) состоит из одной положительной и одной отрицательной линзы. Их применяют в двух комбинациях: «крон (К) впереди», когда к предмету обращена линза из крона, или «флинт (Ф) впереди». Кроновые стекла более устойчивы к атмосферным и механическим воздействиям.

Оптические характеристики объективов.

Двухлинзовые склеенные объективы не могут иметь относительные отверстия:

- больше, чем 1:4 при $f' < 150$ мм,
- 1:5 при f' до 300 мм,
- 1:6 при f' до 500 мм,
- 1:8-1:10 при f' до 1000 мм.



Рис. 10.1: а) двухлинзовый склеенный; б) двухлинзовый несклеенный объектив

Поле зрения двухлинзовых склеенных объективов не должно превышать $10-15^\circ$ при малых фокусных расстояниях и $7-10^\circ$ при больших f' .

Хорошие результаты для увеличения апертуры дает ОС из двух одинаковых склеенных объективов, поставленных вплотную друг к другу, с одинаковым расположением радиусов кривизны. Она увеличивает в 2 раза относительное отверстие по сравнению с одним склеенным компонентом, поэтому все aberrации высших порядков уменьшаются.

Окуляр – последний компонент телескопических систем, находящийся непосредственно перед глазом наблюдателя (или другого приемника световой энергии). В его переднем фокусе образуется изображение бесконечно далеких предметов, создаваемое объективом (одним или в комбинации с оборачивающими системами, призмными или линзовыми). Для окуляров характерны большие полевые углы, большое расстояние от последней поверхности до выходного зрачка.

Видимое увеличение окуляра	$\Gamma_{\text{ок}} = \frac{250}{f'_{\text{ок}}}$	10.5
Относительное отверстие объектива и окуляра	$\frac{D}{f'_{\text{об}}} = \frac{D'}{f'_{\text{ок}}}$	

Главное внимание при исправлении aberrаций в окуляре обращают на aberrации наклонных пучков: дисторсию, астигматизм, кривизну поля, хроматическую разность увеличений. Осевые aberrации устраняют лишь при наличии сеток.

Окуляр Рамсдена (рис. 10.2, а) состоит из двух плосковыпуклых линз, обращенных друг к другу выпуклостями. Передний фокус окуляра (в прямом ходе) находится впереди окуляра.

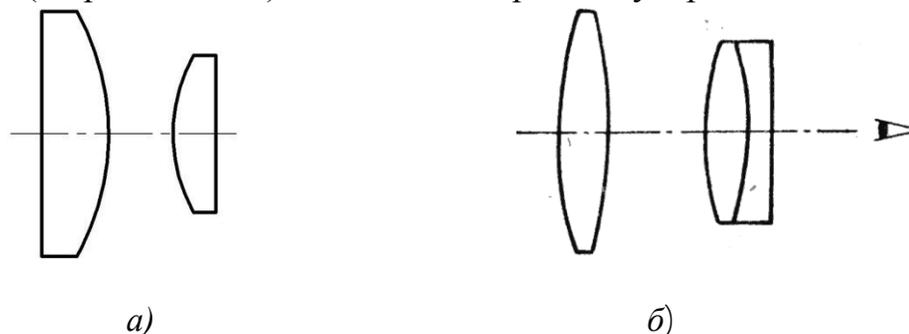


Рис. 10.2: а) окуляр Рамсдена; б) окуляр Кельнера

Наибольшее распространение получили *окуляры Кельнера* (рис. 10.2,б), состоящие из коллективной линзы (плоско-выпуклой или двояковыпуклой линзы) и глазной – склейки (линза, обращенная к глазу, обычно из флинта, другая – из крона). Применение склеенной линзы уменьшает сферическую и хроматическую aberrации и увеличивает полк окуляра $2\omega'$ от 40 до 50°. Особо больших преимуществ окуляр Кельнера не дает. Окуляры, состоящие из двух компонентов, не могут иметь $2\omega' > 50^\circ$.

10.3. Ограничение пучков лучей в телескопической системе

В *трубе Кеплера* апертурная диафрагма АД (входной зрачок) совпадает с оправой объектива или вынесена перед оптической системой.

Положение выходного зрачка определяется ходом главного луча, а его размер – ходом апертурного луча. В визуальных телескопических системах глаз наблюдателя совмещен с выходным зрачком ОС.

Расчетная формула поля зрения в пространстве предметов	$tg \omega = \frac{D_{\text{пд}}}{f'_1} = \frac{tg \omega'}{\Gamma}$	10.6
Диаметр полевой диафрагмы	$D_{\text{пд}} = 2 \cdot f'_2 \cdot tg \omega'$	10.7
Светосила	$H = \frac{E'}{L}$ $H = \rho \cdot D'^2 \quad (H = \rho \cdot D_{\text{гл}}^2)$ $\rho = \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \cdot \frac{\tau \cdot \pi}{4 \cdot (f'_{\text{гл}})^2}$	10.8
Положение входного зрачка в трубе Галилея a_ρ	$a_\rho = a'_\rho \Gamma^2 + f'_1 (\Gamma - 1)$	10.9

В трубе Кеплера полевая диафрагма ПД расположена в плоскости промежуточного изображения (в передней фокальной плоскости окуляра). В этой же плоскости расположено визирное устройство (сетка, шкала), оправа которой служит ПД.

Ограничение пучков *трубы Галилея* рассматривается в системе «труба + глаз». Апертурной диафрамой (АД) в системе «труба + глаз» является зрачок глаза наблюдателя, который является выходным зрачком ОС. Такую телескопическую систему используют в театральных, туристических биноклях, а также в качестве коллимирующих систем лазерного излучения (обратные системы).

Размер и положение зрачка глаза наблюдателя определяют размер АД и ее положение (отрезок a'_ρ), эта величина является исходной для габаритного расчета трубы Галилея.

Входной зрачок *мнимый* и всегда располагается справа в телескопической системе Галилея. В трубе нет действительного промежуточного изображения, поэтому отсутствует полевая диафрагма, т.е. нельзя использовать визирное устройство и сетку с делениями. Поле зрения резко не определено, в системе неизбежно виньетирование. Угловое поле в трубе Галилея ограничивается виньетирующей диафрагмой (ВД), роль которой выполняет оправа объектива. Угловое поле зрения рассчитывают из условий допустимого виньетирования.

10.4. Габаритный расчет трубы Кеплера

В системе Кеплера фокусные расстояния объектива и окуляра положительные ($f'_1 > 0$, $f'_2 > 0$), поэтому видимое увеличение $\Gamma_T = -\frac{f'_1}{f'_2} < 0$, и изображение перевернутое. Труба Кеплера имеет действительное промежуточное изображение, расположенное в задней фокальной плоскости объектива, совпадающей передней фокальной плоскостью окуляра.

Достоинством зрительной трубы Кеплера является использование шкал и сеток с делением.

На рисунке 10.3 представлена схема с ходом лучей для трубы Кеплера из тонких компонентов.

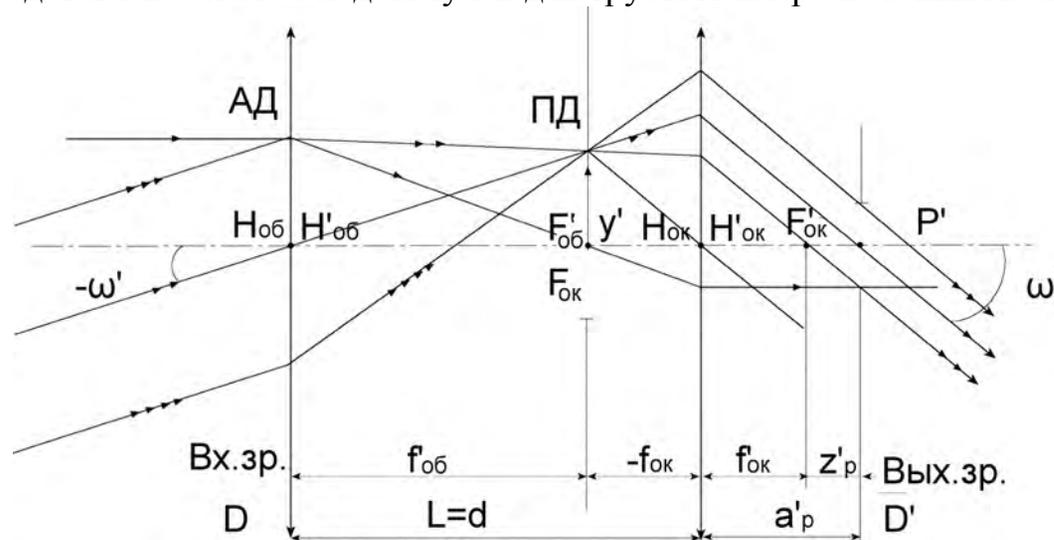


Рис. 10.3. Ход лучей в трубе Кеплера при $a_p=0$

Алгоритм габаритного расчета трубы Кеплера.

1. Видимое увеличение:

$$\Gamma_T = \frac{tg\omega'}{tg\omega} = \frac{D}{D'} = -\frac{f'_1}{f'_2}$$

2. Расстояние между компонентами:

$$d = f'_1 + f'_2$$

3. Размер полевой диафрагмы:

$$D_{\text{пд}} = 2f'_1 \cdot \text{tg}\omega = 2f'_2 \cdot \text{tg}\omega'$$

4. Удаление выходного зрачка от заднего фокуса окуляра:

$$z'_p = \frac{z_p}{\Gamma^2}$$

где z'_p – расстояние входного зрачка от переднего фокуса объектива.

5. Удаление выходного зрачка от задней главной плоскости окуляра a'_p :

$$a'_p = f'_2 + z'_p$$

При этом коэффициент виньетирования определяется выражением:

$$k_\omega = \frac{D - \bar{D}}{D},$$

где \bar{D} – ширина наклонного пучка лучей, измеренная в плоскости входного зрачка диаметром D .

$$\bar{D} = 2m$$

$$|\Gamma_\tau| = \frac{m}{m'}$$

6. Разрешающая способность (угловая), по теории дифракции:

$$\Psi = \frac{1,22\lambda}{D} \quad (10.10)$$

Для $\lambda = 0,000546$ мм при использовании коэффициента перехода от радиан к секундам:

$$\Psi = \left(\frac{140}{D} \right)''$$

В этом случае контраст между дифракционными изображениями рядом расположенных точек составляет 22,5%. (критерий используется для приборов серийного и массового изготовления). По астрономическому кри-

терию глаз способен различать контраст порядка 5%. Формула для определения разрешающей способности точных приборов:

$$\Psi = \left(\frac{120}{D} \right)''$$

Угловой предел разрешения, учитывающий свойства глаза:

$$\Psi = \frac{60''}{\Gamma_T}$$

7. Необходимое перемещение окуляра для компенсации недостатков зрения:

$$\Delta = \frac{f_2'^2}{\frac{1000}{A_D} + z_p'}$$

где A_D – аметропия глаза в диоптриях; z_p' – расстояние от F' окуляра до глаза.

10.5. Расчет системы Галилея

Достоинства системы Галилея:

- простота конструкции;
- малые потери яркости (10-15%), что позволяет применять его при плохом освещении (сумерки, туман);
- ввиду малого увеличения трубы aberrации объектива и окуляра могут частично компенсироваться.

Недостатки:

- нет действительных изображений, невозможно устранить затенение (нельзя разместить ПД);
- малое поле зрения.

Фокусное расстояние объектива в трубе Галилея положительное ($f_1' > 0$), а фокусное расстояние окуляра отрицательное ($f_2' < 0$), видимое увеличение $\Gamma_T = -\frac{f_1'}{f_2'} > 0$, и система дает прямое изображение.

На рис. 10.4. представлена оптическая схема трубы Галилея с ходом лучей.

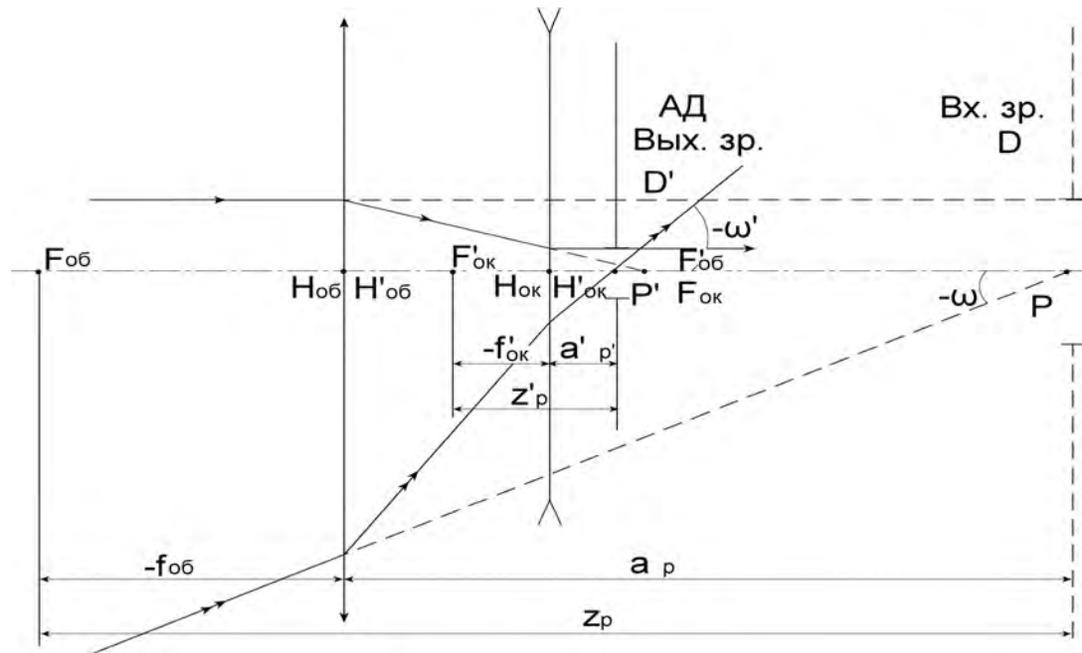


Рис. 10.4. Оптическая схема трубы Галилея с ходом лучей.

В зависимости от степени виньетирования угловое поле в пространстве предметов можно рассчитать:

а) при отсутствии виньетирования:

$$tg\omega = \frac{D_{об} - D}{2a_p} \quad (10.11)$$

б) при виньетировании 50%:

$$tg\omega = \frac{D_{об}}{2a_p} \quad (10.12)$$

в) при виньетировании 100%:

$$tg\omega = \frac{D_{об} - D}{2a_p}$$

Поле зрения в трубе Галилея возрастает с увеличением диаметра объектива. Обычно принимают виньетирование 50% , когда диаметры объектива и окуляра определяются выражениями:

$$D_{об} = D_{од} = 2a_p \cdot tg\omega \quad (10.13)$$

$$D_{ок} = 2a'_p \cdot tg\omega'$$

10.6. Фокусировка окуляра в зрительной трубе

Продольное смещение окуляра	$\Delta = \frac{f_2^2}{\frac{1000}{A_D} + z'_p}$	10.14
-----------------------------	--	-------

10.7. Расчет коллектива для зрительной трубы Кеплера

Для изменения поперечных габаритов в задней фокальной плоскости объектива устанавливают *коллектив*. Положительная линза коллектива служит для сопряжения зрачков трубы (АД должна располагаться в середине воздушного промежутка между объективами оборачивающей системы). В этом случае наилучшее прохождение всего наклонного пучка через ОС. Расчет фокусного расстояния коллектива по ходу главного луча (рис.10.5).

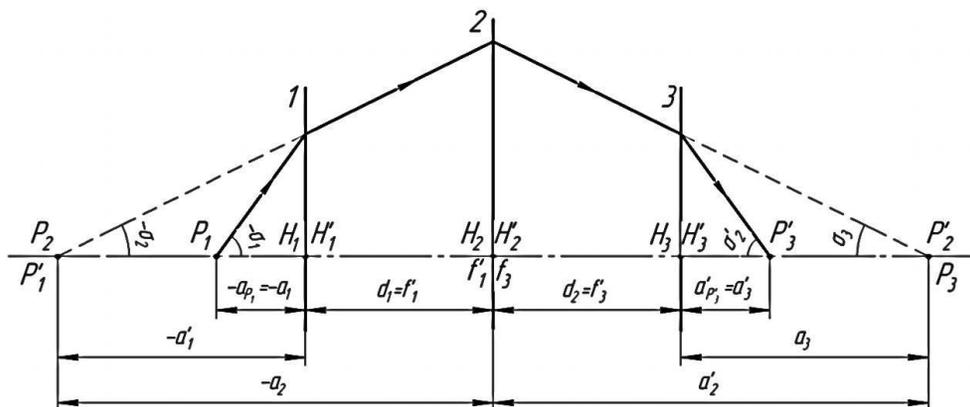


Рис.10.5. Ход главного луча

<p>Положения зрачков для компонентов (рис.10.5)</p>	$a'_1 = \frac{t}{1 + t \cdot \Phi_1}$ $a_2 = a'_1 - f'_1 = a'_1 - \frac{1}{\Phi_1}$ $a'_2 = a_3 + f'_3 = a_3 + \frac{1}{\Phi_3}$ $a_3 = \frac{t}{1 - t \cdot \Phi_3}$	
<p>Оптическая сила коллектива</p>	$\Phi_2 = \frac{1}{a'_2} - \frac{1}{a_2}$	
<p>Расчетная формула оптической силы коллектива</p>	$\Phi_2 = \Phi_1 \cdot (1 + t \cdot \Phi_1) + \Phi_3(1 - t' \cdot \Phi_3)$	<p>10.15</p>

11. ПРОЕКЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

11.1. Основные характеристики проекционных систем

Оптические системы проекционных приборов состоят из 2-х частей: осветительной и проекционной.

Проекционные и осветительные системы должны быть согласованы по апертуре и полю зрения с целью получения требуемой освещенности экрана и её распределения при заданном масштабе изображения.

Эпископическая проекция – проекция непрозрачного предмета, образованная лучами света, отраженного от предмета (в отраженном свете).

Диаскопическая проекция – проекция, образованная лучами света, проходящими сквозь предмет, сюда же относят кинопроекцию.

Основные характеристики: масштаб изображения (линейное увеличение), освещенность изображения и размер проецируемого предмета, иногда экрана. Эти характеристики определяют:

- проекционное расстояние;
- диаметр входного зрачка проекционного объектива;
- яркость;
- пропускание системы;
- схема и конструкция осветительной системы.

Проекционное расстояние – расстояние от объектива до экрана.

Отличительные особенности проекционных объективов.

1) Обеспечение постоянства контраста и разрешающей способности при проекции в проходящем свете; в отраженном свете – удовлетворительном контрасте и разрешающей способности.

2) Малое виньетирование

3) Повышенное требование к коррекции дисторсии.

Требуемая освещенность экрана зависит от назначения проекционного прибора.

Принимают *яркость экрана* L при:

- кинопроекции (в кинотеатрах) 100 кд/м^2 ;
- диа-проекции 50 кд/м^2 ;
- эпи-проекции до 20 кд/м^2 ;
- для контрольно-измерительных приборов $L=15-25 \text{ кд/м}^2$.

Для равнорких источников	$\pi \cdot L_e = \rho \cdot E_e$	11.1
Освещенность во внеосевой точке изображения	$E'_W = k_\omega \cdot E'_0 \cdot \cos^4 \omega$	11.2
Сила света	$I_v = \frac{\Phi_v}{2 \cdot \pi}$	11.3
Яркость	$L_v = \frac{\Phi_v}{4 \cdot \pi \cdot Q}$	11.4
Освещенность изображения	$E_v = \tau_a \cdot \frac{I_{vnp}}{p^2}$ $E_v = \pi \cdot L_v \cdot \tau_{oc} \cdot \sin^2 \sigma'$	11.5
Задний апертурный угол	$\sin \sigma' = \frac{D'}{2 \cdot f}$	
Освещенность изображения осевой точки изображения	$E_0 = \frac{\tau \cdot \pi \cdot L}{4 \cdot k^2}$	
Инвариант согласования апертур	$I = \sin_k d = \sin \omega \cdot D$ $I = \sin_{кол} d = 2 \cdot y \cdot A_{об}$	

Коэффициент диффузного рассеяния ρ :

- для идеально белого экрана $\rho=1$;
- экран, покрытый слоем углекислого Mg, $\rho=0,89$;
- экран из технической окиси цинка $\rho=0,8$;
- для материалов экрана из пластмасс $\rho=0,72$.

Рекомендуемые освещенности центральной части экранов при $\rho=0,8$ ($\pi L_e = \rho E_e$).

Коммерческая кинопроекция $E=400$ лк.

Демонстрационная $E=200$ лк.

Эпи-проекция E до 80 лк.

Контрольно-измерительные приборы $E=60-100$ лк.

При удалении от центра освещенность экрана изменяется: $E'_W = k_\omega \cdot E'_0 \cdot \cos^4 \omega$

11.2. Расчет эпископической проекционной системы

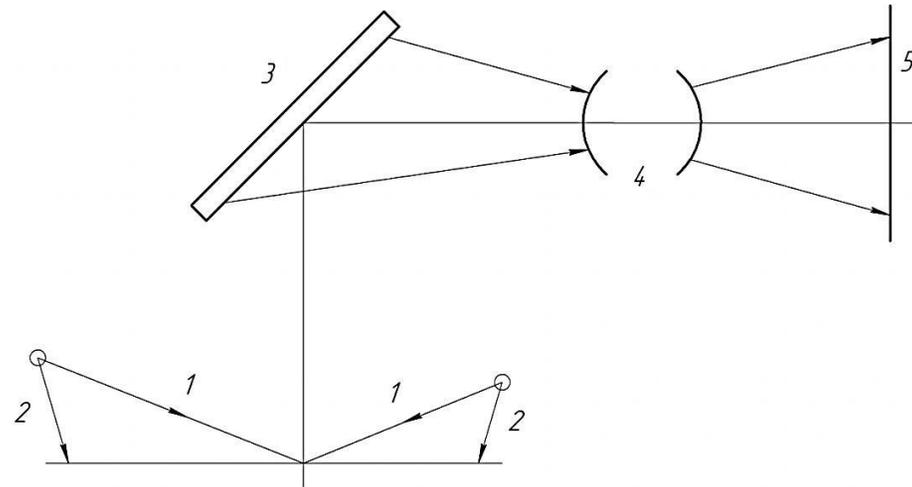


Рис.11.1. Эпископическая ОС: 1 – непрозрачный плоский предмет; 2 – лампа; 3 – зеркало с внешним отражающим покрытием для получения прямого изображения; 4 – объектив; 5 – экран

Поверхность предмета – диффузно рассеивающая, поэтому $L_{пр} = \rho_{пр} \cdot E_{пр} / \pi$, где $\rho_{пр}$ – коэффициент отражения от поверхности предмета; E – освещенность предмета; m – число источников (ламп); J – сила света каждой лампы; l – расстояние от тела накала лампы до центра поверхности предмета; ε – угол между нормалью к поверхности предмета и лучом, проходящим между телом накала и центром поверхности предмета.

Освещенность центра экрана: $E' = \tau \pi L_{пр} \sin^2 \sigma_A'$, где τ – коэффициент пропускания системы, состоящей из зеркала и объектива ($\tau = \rho_3 \tau_{об}$); σ_A' – задний апертурный угол объектива.

Линейное увеличение в зрачках $\beta_p = 1$; $p' \gg D$, поэтому $\sin \sigma_A' = D' / 2p'$.

Яркость	$L_{\text{пр}} = \rho_{\text{пр}} \cdot \frac{E_{\text{пр}}}{\pi}$	
Освещенность	$E_{\text{пр}} = \sum_{j=1}^m E_j = \frac{\sum I \cdot \cos \varepsilon}{l^2}$	11.6
Освещенность центра экрана	$E' = \tau \cdot \pi \cdot E_{\text{пр}} \sin^2 \sigma'_{\text{об}}$ $E'_0 = \frac{\tau \cdot \rho_{\text{пр}} \cdot E_{\text{пр}}}{4} \cdot \left(\frac{D}{f'_{\text{об}}}\right)^2 \cdot \frac{1}{(1 - \beta_{\text{об}})^2}$	
Фокусное расстояние объектива	$f'_{\text{об}} = \frac{p'}{1 - \beta_{\text{об}}}$	
Линейное увеличение объектива	$\beta_{\text{об}} = \frac{p'}{p}$	
Величина поля зрения	$\text{tg } \omega_{\text{об}} = -\beta_{\text{об}} \cdot \frac{y}{p'} = -\beta_{\text{об}} \frac{y}{(1 - \beta_{\text{об}}) \cdot f'_{\text{об}}}$	11.7
Проекционное расстояние	$p' \approx f'_{\text{об}} \cdot (1 - \beta_{\text{об}})$ $\sin \sigma'_{\text{об}} = \frac{D}{2 \cdot p'}$	11.8

11.3. Расчет диаскопической проекционной системы

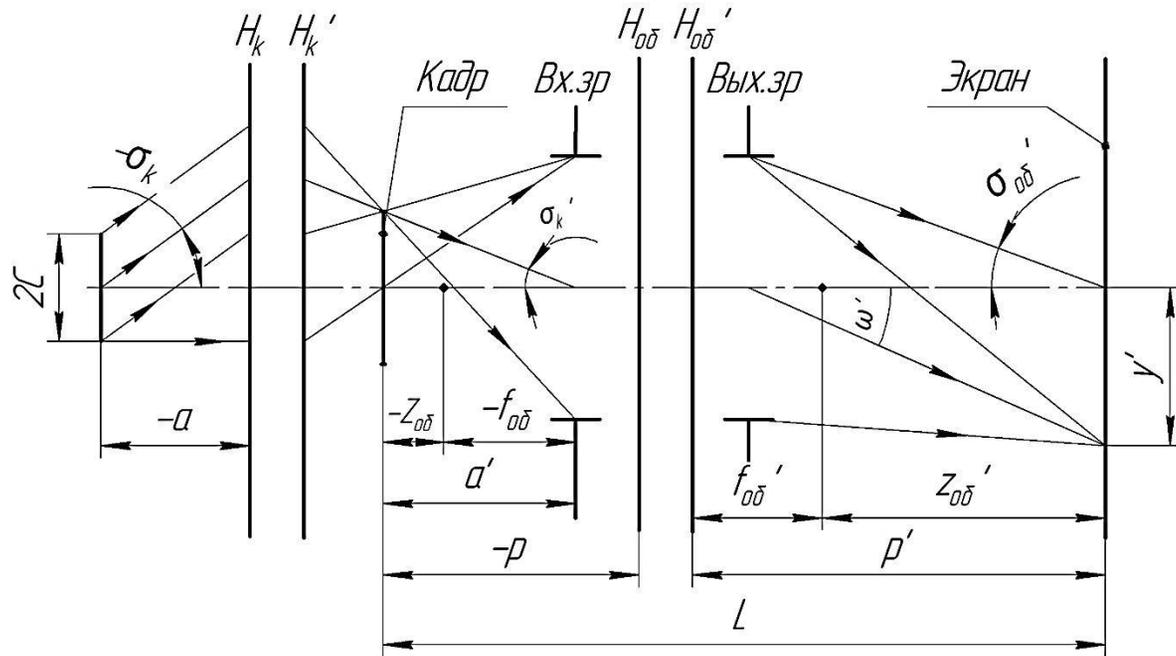


Рис.11.2. Ход лучей в диапроеctionной системе

Алгоритм расчета следующий:

Задание оптических и габаритных характеристик:

- освещенность экрана $E^o=200\text{лк}$, яркость $L=50\text{кд/м}^2$; используют соотношение $\pi L = \rho E$;
- проекционное расстояние p' ;
- характеристики источника света: тип лампы; размер источника $2c$, яркость L , световой поток $F_0\text{энер}$.

Габаритный расчет.

1. Фокусное расстояние объектива: $f' = \frac{p'}{1-\beta_{об}}$, где $\beta_{об} = -\frac{y'}{y} = \frac{p'}{p}$;
2. Проекционное расстояние: $p = \frac{p'}{\beta_{об}} = \frac{f'(1-\beta_{об})}{\beta_{об}}$;

3. Линейное увеличение конденсора: $\beta_k = \frac{\sin \sigma_k}{\sin \sigma'_k} = -\frac{D}{2C} = \frac{a'}{a}$.

D – диаметр входного зрачка; $2C$ – размер источника.

4. Задний апертурный угол конденсора равен полевому углу в проекционном объективе, $\sigma'_k = \omega_{об}$ или $\sin \sigma'_k = tg \omega_{об}$, где $tg \omega = \frac{y}{-p} = -\frac{y\beta}{f'(1-\beta)}$ – угол поля зрения объектива. Расчетная формула:

$$\sin \sigma_k = \beta_k tg \omega = \frac{D}{f'} \cdot \frac{y}{2C} \cdot \frac{\beta}{1-\beta}$$

Фокусное расстояние	$f'_{об} = \frac{p'}{1-\beta_{об}}$	
Линейное увеличение объектива	$\beta_{об} = \frac{y'}{y} = \frac{p'}{p}$ $p = \frac{p'}{\beta_{об}} = \frac{f'_{об} \cdot (1-\beta_{об})}{\beta_{об}}$	11.9
Линейное увеличение конденсора	$\beta_k = \frac{\sin \sigma_k}{\sin \sigma'_k} = \frac{D}{2 \cdot c} = \frac{a'_k}{a_k}$	
Апертурные углы конденсора	$\sin \sigma'_k = tg \omega = \frac{y}{-p} = \frac{-y \cdot \beta_{об}}{f'_{об} \cdot (1-\beta_{об})}$ $\sin \sigma_k = \beta_k \cdot tg \omega = \frac{y}{-p} = \frac{D \cdot y \cdot \beta_{об}}{f'_{об} \cdot 2 \cdot c \cdot (1-\beta_{об})}$	
Диаметр входного зрачка объектива	$D = 2 \cdot p' \cdot \sqrt{\frac{E'_0}{\pi \cdot \tau \cdot L}}$	11.10
Освещенность	$E'_0 = \pi \cdot \tau \cdot L \cdot \sin^2 \sigma'_{об} = \pi \cdot \tau \cdot L \cdot \frac{D^2}{4 \cdot (f'_{об})^2 \cdot (1-\beta_{об})^2}$ $E'_0 = \pi \cdot \tau \cdot L \cdot \frac{(D')^2}{4 \cdot (p')^2}$	

Светотехнический расчет

$$E'_0 = \pi\tau L \sin^2 \sigma' = \pi\tau L \frac{D^2}{4f'^2(1-\beta)^2} = \pi\tau L \frac{D^2}{4p'^2}$$

5. Диаметр входного зрачка $D = 2p' \sqrt{\frac{E'}{\pi\tau L}}$, где L – яркость источника; коэффициент пропускания ориентировочно $\tau = 0,5 - 0,7$
6. Расчет относительного отверстия: $\frac{D}{f'}$;
7. Линейное увеличение конденсора $\beta_k = -\frac{D}{2C}$, $2C$ – наименьший размер светящегося тела;
8. Суммарный угол охвата конденсора равен сумме углов охвата и сходимости $2(|\sigma_k| + |\sigma'_k|)$
9. Определение типа конденсора: одно-, двух-, трехлинзовый и т.д.

11.4. Осветительные системы проекционных приборов

Осветительные системы предназначены для освещения объектов направленными пучками лучей.

Конденсор создает действительное изображение источника света либо непосредственно на освещенном предмете (схема применяется, если яркость излучающей поверхности источника света равномерна, рис.11.3, а), либо во входном зрачке D последующей оптической системы (рис.11.3, б).

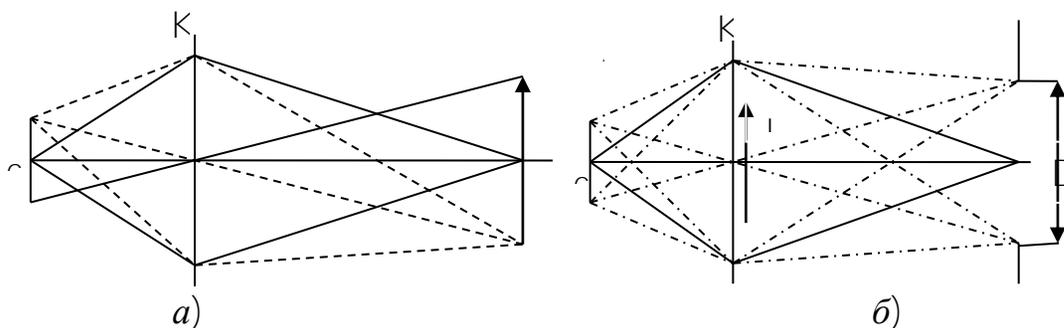


Рис.11.3. Оптические системы конденсоров: а) – проекция источника на предмет; б) – проекция во входной зрачок объектива

В этом случае предмет / обычно располагается вблизи конденсора, так как его диаметр будет наименьшим.

При неравномерной яркости рекомендуется применять схему (рис. 11.3, б), так как в этом случае каждая точка предмета освещается лучами, исходящими из всех точек излучающей поверхности.

В связи с ограниченной номенклатурой и сложностью применения источников с равномерной яркостью наибольшее применение получили осветительные системы, изображенные на рис. 11.3, б.

Сложность конструкции конденсора определяется величиной угла охвата (апертурным углом $2\sigma_k$) и линейным увеличением конденсора β_k или фокусным расстоянием f'_k . Обычно в конденсорах исправляют сферическую aberrацию. Эмпирически установлено, что результат при этом получается удовлетворительным даже при использовании однолинзового конденсора, если угол охвата не превышает 20° . При углах охвата до 50° необходимо делать конденсор двухлинзовым, а до 70° – трехлинзовым.

Существуют линзовые, зеркальные и зеркально-линзовые конденсоры. Иногда в конденсорах исправляют хроматизм положения и кому. В ряде же случаев даже от условия исправления сферической aberrации отступают и из технологических соображений применяют плоско-выпуклые линзы. Для увеличения угла охвата и уменьшения числа линз иногда применяют *асферические поверхности*, обычно параболоидные.

Линзовый конденсор

Это оптическая система, создающая действительное изображение источника света на конечном расстоянии от неё. Оптические характеристики: f' , β (линейное увеличение); относительное отверстие; угол охвата $2\sigma_A$ и угол сходимости $2\sigma'_A$, $k = \frac{f'}{D}$ – диафрагменное число.

Форма и число линз конденсора зависит от β :

- однолинзовый: сумма углов охвата и сходимости не превышает 45° ;
- двухлинзовый конденсор: сумма углов $\leq 60^\circ$;
- трёхлинзовый: сумма углов $\leq 100^\circ$.

Технологический вариант – система, состоящая из определенного числа линз, рассчитанных на минимум сферической aberrации и выполненных из одинакового сорта стекла, к примеру, из стекла К8.

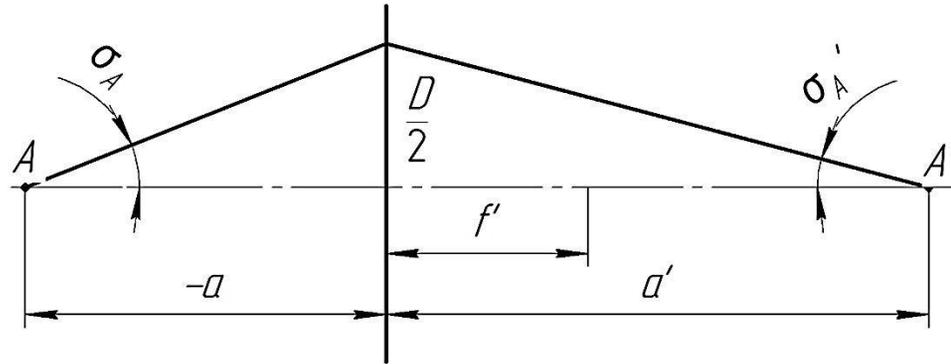


Рис.11.4. Ход апертурного луча в конденсоре

Расчет передней апертуры	$\operatorname{tg} \sigma = \frac{D}{2 \cdot a} = \frac{D \cdot \beta}{2 \cdot a'}$ $a' = (1 - \beta) \cdot f'$ $\operatorname{tg} \sigma = \frac{\beta}{2 \cdot (1 - \beta) \cdot k}$	
--------------------------	--	--

Расчет конденсора на минимум сферической аберрации:

Стеклянные углы (внутри линз):

$$\alpha_i = \frac{2 + \mu}{1 + 2\mu} \cdot \frac{[2k - (i - 1)]\beta_k + (i - 1)}{2k}$$

$$k - \text{число линз}; \quad i=2,4 \dots 2k; \quad \mu = \frac{1}{n}; \quad \beta_k = \frac{\alpha_1}{\alpha_{2k+1}}; \quad \alpha_1 = \beta_k; \quad \alpha_{2k+1} = 1.$$

Воздушные углы:

$$\alpha_i = \frac{[2k - (i - 1)]\beta_k + (i - 1)}{2k}$$

$k=1, m=0,1$ – однолинзовый; $k=2, m=0,1,2$ – двухлинзовый; $k=3, m=0,1,2,3$ – трёхлинзовый.

Углом охвата $2\sigma_A$ называют двойной апертурный угол в пространстве предметов, он характеризует полностью использования потока света.

Сферическая aberrация	$\delta s' = \frac{-1}{2} \operatorname{tg}^2 \sigma' \sum_{k=1}^{k=m} h_k \cdot P_k$	
Основной aberrационный параметр	$P_k = \left(\frac{\alpha_{k+1} - \alpha_k}{\mu_{k+1} - \mu_k} \right) (\alpha_{k+1} \cdot \mu_{k+1} - \alpha_k \cdot \mu_k)$	
Радиус оптической поверхности	$r_k = \frac{h_k \cdot (n_{k+1} - n_k)}{\alpha_{k+1} \cdot n_{k+1} - \alpha_k \cdot n_k}$	
Толщина или воздушный промежуток	$d_k = \frac{h_k - h_{k+1}}{\alpha_{k+1}}$	

Сферические зеркала (осветители) имеют угол охвата до 110° . При этом учитывают $\Delta\sigma'$ – угловую сферическую aberrацию (возникает при больших D для сферического зеркала).

Для устранения сферической aberrации в сходящемся пучке отраженных лучей устанавливают корректоры (к примеру, корректирующая пластина Шмидта).

11.5. Оптическая система прожектора

Прожектором называется оптическая система, концентрирующая часть светового потока источника света в узкий пучок, как для освещения удаленных предметов, так и для передачи сигналов на большие расстояния.

Прожекторы разделяются на приборы:

- дальнего действия с диаметрами выходного зрачка $D' = 800 \div 2100$ мм;
- ближнего действия с $D' = 500 \div 650$ мм;
- светосигнальные с $D' = 105 \div 250$ мм и
- коллиматоры, отличающиеся тем, что освещаемый предмет располагается вблизи прибора.

Основными оптическими характеристиками являются сила света, коэффициент усиления, дистанция оформления пучка, угол рассеяния и угол охвата.

Освещенность изображения определяют по формуле:

$$E' = \tau \pi L' \sin^2 \sigma'_{A'}$$

где $\tau = \tau_{oc} \tau_{атм}$; τ_{oc} – коэффициент пропускания оптической системы; $\tau_{атм}$ – коэффициент пропускания атмосферы или другой среды на пути хода лучей после действия прожектора; $L' = (n'/n)^2 L$ – яркость изображения, определяемая по формуле; L – яркость источника; n и n' – показатели преломления среды пространства, где помещен источник, и среды пространства изображений соответственно. Обычно $n = n' = 1$.

Для определения значения $\sin \sigma'_{A'}$ обратимся к рис. 11.5.

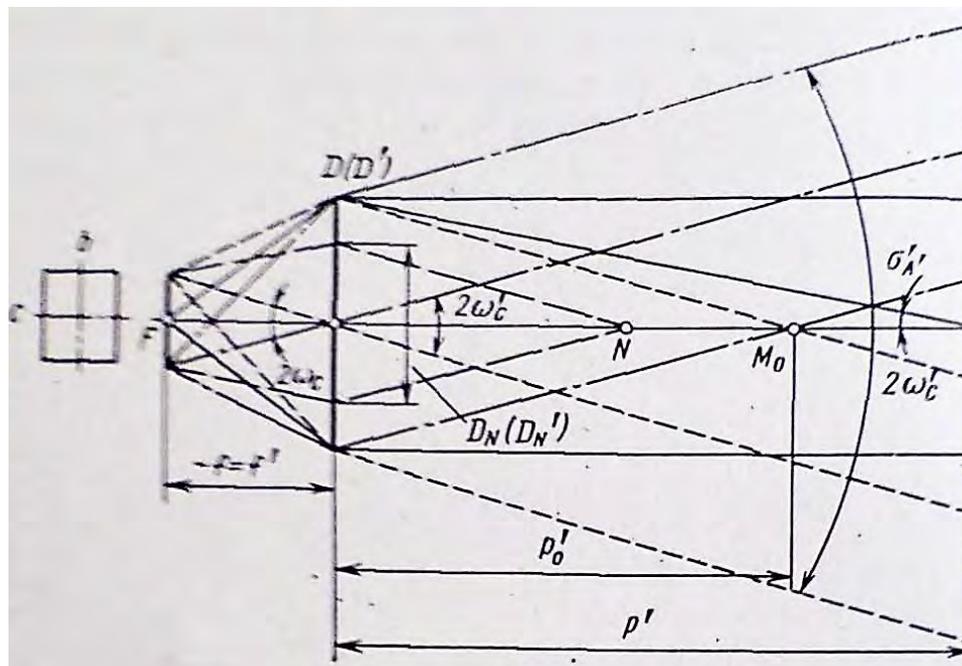


Рис.11.5. Оптическая система прожектора

Источник света с прямоугольной излучающей площадкой размерами $c \times b$ помещен в передней фокальной плоскости оптической системы, представленной в виде бесконечно тонкой линзы. Освещаемый предмет находится на большом расстоянии p' от оптической системы. Поэтому

$$\sin \sigma'_{A'} \approx \frac{D}{2p'},$$

где D – диаметр входного зрачка ОС, который обычно принимают равным диаметру D' выходного зрачка.

Таким образом:

$$E' = \tau \pi \left(\frac{n'}{n} \right)^2 L \frac{D^2}{p'^2},$$

$$E' = \frac{J_{np}}{p'^2},$$

где J_{np} – сила света прожектора.

Расчетная формула для силы света прожектора

$$J_{np} = \tau \pi \left(\frac{n'}{n} \right)^2 L \frac{D^2}{4},$$

при $n' = n = 1$

$$J_{np} = \tau L Q'_{зр},$$

где $Q'_{зр}$ – площадь выходного (входного) зрачка; $D = D'$.

Сила света прожектора растет пропорционально площади зрачка при одной и той же яркости источника света. Формулы справедливы при удалении освещаемого предмета от прожектора на расстояние $p' \geq p'_0$. (*дистанцией оформления пучка*: точка M_0 – первая по ходу лучей, в образовании которой участвуют лучи, идущие в край входного зрачка диаметром D).

Для прожектора (коллиматора)

$$p'_0 \approx \frac{Df'}{c}$$

Коэффициентом усиления прожектора называют отношение силы света прожектора к силе света источника по направлению нормали:

$$k_{\text{пр}} = \frac{J_{\text{пр}}}{J_{\text{ист}}} = \frac{\tau L Q'_{\text{зр}}}{L Q_{\text{ист}}} = \tau \left(\frac{D}{d}\right)^2$$

где d – диаметр источника. Коэффициент усиления прожектора достигает значения $k_{\text{пр max}} = 10\,000$.

Угол *рассеяния* прожектора $2\omega'$ зависит от размеров c и b источника света и от сферической аберрации ОС. Угол рассеяния в меридиональной плоскости $2\omega'_c = 2\omega_c$

$$\text{tg}\omega'_c = \frac{c}{2f'}$$

в плоскости, перпендикулярной

$$\text{tg}\omega'_b = \frac{b}{2f'}$$

Обычно фокусное расстояние f' значительно превышает c и b .

При использовании точечного излучателя угол рассеяния появляется за счет дифракции:

$$2\omega' = \frac{\lambda}{D}$$

Для $\lambda = 6 \cdot 10^{-4}$ мм

$$2\omega' = \frac{120''}{D}$$

Так как оптическая система прожектора (коллиматора) обычно имеет сферическую аберрацию, то действительный угол рассеяния будет больше, чем вычисленный по приведенным выше формулам.

Диаметр освещаемой поверхности

$$2y' = D + 2\omega'p'$$

Выбор фокусного расстояния объектива коллиматора: чем больше фокусное расстояние f' тем меньше угол рассеяния, определяемый конечными размерами c и b источника излучения. Фокусное расстояние f' объектива определяют при заданном допустимом угле рассеяния и известных размерах излучающей площадки, учитывая влияние сферической аберрации и явление дифракции.

Освещенность изображения	$E'_0 = \tau \cdot \pi \cdot L' \cdot \sin^2 \sigma' = \tau \cdot \pi \cdot \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \cdot L \cdot \frac{D^2}{4p'^2}$	
Коэффициент пропускания	$\tau = \tau_{\text{ос}} \cdot \tau_{\text{атм}}$	
Задний апертурный угол	$\sin \sigma' = \frac{D}{2 \cdot p'}$	
Сила света прожектора	$I_{\text{пр}} = \tau \cdot \pi \cdot \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \cdot L \cdot \frac{D^2}{4}$ $I_{\text{пр}} = \tau \cdot L \cdot Q'_{\text{зр}}$	11.11
Дистанция оформления пучка	$p'_0 = \frac{D \cdot f'}{c}$	
Коэффициент усиления прожектора	$k_{\text{пр}} = \frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{ист}}} = \frac{\tau \cdot L \cdot Q'_{\text{зр}}}{L \cdot Q_{\text{ист}}} = \tau \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^2$	11.12
Угол рассеяния прожектора	$\text{tg } \omega'_c = \frac{c}{2 \cdot f'}$ $\text{tg } \omega'_b = \frac{b}{2 \cdot f'}$	11.13
Размер освещаемой площадки	$2 \cdot y = D' + 2 \cdot \omega' \cdot p'$	11.14

12. МИКРОСКОПЫ

Микроскоп служит для рассматривания близкорасположенных объектов при большом увеличении (рис.12.1). Микроскоп представляет собой короткофокусную систему и состоит как минимум из двух компонентов – объектива и окуляра. Он должен обеспечить требуемые характеристики: увеличение и разрешение при хорошем качестве изображения и освещённости.

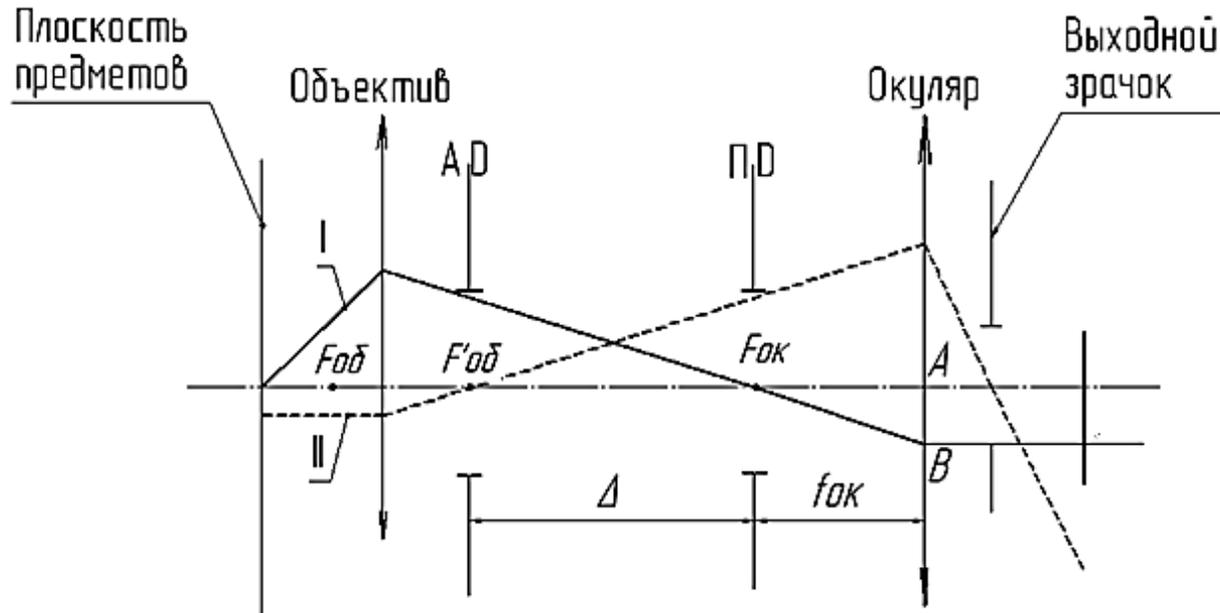


Рис. 12.1. Принципиальная схема микроскопа

12.1. Оптические характеристики микроскопа

Основные характеристики: видимое увеличение Γ , линейное поле зрения $2y$, размер выходного зрачка D' .

Линейное увеличение объектива	$\beta_{об} = \frac{-\Delta}{f'_{об}}$	
Видимое увеличение окуляра	$\Gamma_{ок} = \frac{250}{f'_{ок}}$	
Видимое увеличение микроскопа	$\Gamma_M = \beta_{об} \cdot \Gamma_{ок}$ $\Gamma_M = \frac{250}{f'_M}$	12.1
Диаметр полевой диафрагмы	$D_{пд} = 2 \cdot y' = 2 \cdot f'_{ок} \cdot tg \omega' = \frac{500 \cdot tg \omega'}{\Gamma_{ок}}$	12.2
Размер линейного поля зрения	$2 \cdot y = \frac{D_{пд}}{\beta_{об}} = \frac{500 \cdot tg \omega'}{\Gamma_M}$	12.3
Диаметр выходного зрачка	$D' = \frac{500 \cdot A}{\Gamma_M}$	12.4
Линейное увеличение в зрачках	$\frac{D'}{D_{AD}} = \beta_{p(ок)} = \frac{f'_{ок}}{z_p}$	

Объектив микроскопа создает действительное увеличенное и обратное изображение. Изображение после объектива расположено в передней фокальной плоскости окуляра. Действие объектива микроскопа характеризуется линейным увеличением.

$$\beta_{об} = -\Delta / f'_{об}.$$

Δ – оптический интервал (оптическая длина тубуса) равен расстоянию по оптической оси между задним фокусом объектива $F'_{об}$ и передним фокусом окуляра $F_{ок}$.

Окуляр действует как лупа с видимым увеличением $\Gamma = 250 / f'_{ок}$.

По отношению ко всему микроскопу рассматриваемый предмет расположен в передней фокальной плоскости, т.е. микроскоп работает как сложная оптическая система лупы.

$$\Gamma = 250/f'_M,$$

где f'_M – эквивалентное заднее фокусное расстояние микроскопа.

12.2. Глубина изображаемого пространства микроскопа

Глубина изображаемого пространства – часть пространства предметов, расположенная вдоль оптической оси, которая достаточно резко изображается микроскопом (расположена перед фокальной плоскостью микроскопа и за ней).

Аккомодационная глубина	$T_{\text{ак}} = z = \frac{(f'_M)^2}{250} = \frac{250}{\Gamma_M^2}$	12.5
Геометрическая глубина	$T_{\text{г}} = z_1 - z_2 = \frac{250 \cdot \psi'_{\text{гд}}}{\Gamma_M \cdot A}$	12.6
Дифракционная глубина	$T_{\text{д}} = \frac{n \cdot \lambda}{2 \cdot A^2}$	12.7
Глубина изображаемого пространства	$T = T_{\text{ак}} + T_{\text{г}} + T_{\text{д}}$	12.8

Аккомодационная глубина. В процессе наблюдения объемного предмета глаз аккомодирует на различно удаленные точки. Благодаря этому у наблюдателя создается впечатление, что все просматриваемое по глубине пространство видно одинаково резко. Аналогичным будет процесс восприятия по глубине пространства изображений при наблюдении через микроскоп.

Геометрическая глубина. Предмет, расположенный в передней фокальной плоскости микроскопа, изображается на сетчатке глаза резким без аккомодации. Если точки предмета находятся перед фокальной плоскостью и за ней, то на сетчатке вместо резкого изображения точки получится пятно размытия, которое воспринимается наблюдателем как резкие изображения при размере этих пятен меньше некоторой предельной величины, связанной с угловым пределом разрешения глаза.

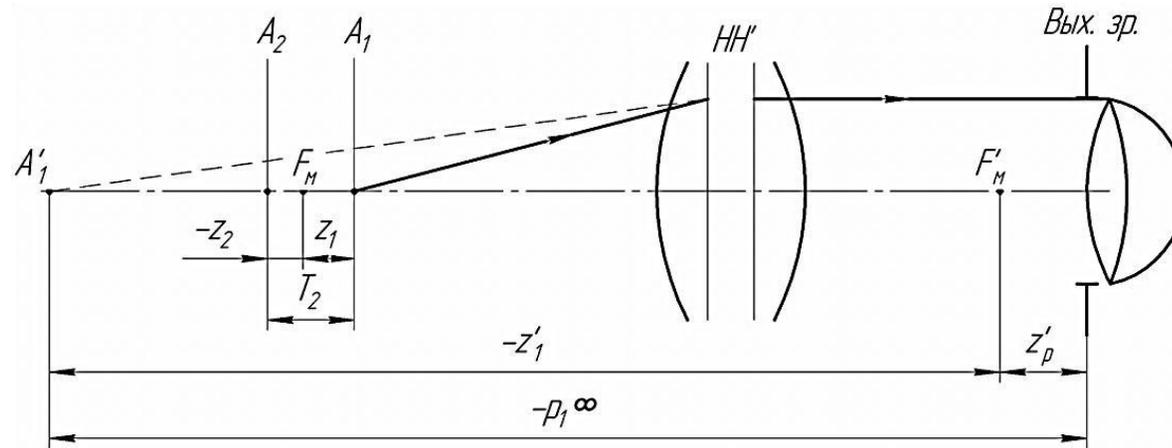


Рис.12.2. Схема для определения глубины изображаемого пространства для микроскопа

Дифракционная глубина. Наличие дифракционных явлений увеличивает глубину изображаемого пространства.

12.3. Ограничение пучков

Линейное поле микроскопа ограничивается размером *полевой диафрагмы*, расположенной в передней фокальной плоскости окуляра. Диаметр диафрагмы $D_{\text{пд}}$ зависит от углового поля окуляра $2\omega'$, в пределах которого получается изображение достаточно хорошего качества:

$$D_{\text{пд}} = 2y' = 2f_{\text{ок}} \operatorname{tg}\omega'$$

В пространстве предметов линейное поле зрения микроскопа

$$2y = \frac{D_{\text{пд}}}{\beta_{\text{об}}} = \frac{500 \cdot \operatorname{tg}\omega'}{\beta_{\text{об}} \bar{\Gamma}_{\text{ок}}} = \frac{500 \cdot \operatorname{tg}\omega'}{\bar{\Gamma}_{\text{м}}}$$

т.е. обратно пропорционально $\bar{\Gamma}$.

Выходной зрачок микроскопа – полученное через окуляр изображение апертурной диафрагмы (в частности, оправы последней линзы объектива), располагаемой между объективом и его задним фокусом. При расположении АД в задней фокальной плоскости объектива, входной зрачок микроскопа перемещается в бесконечность ∞ , создавая телецентрический ход главного луча в пространстве предметов (рационально для конструкций измерительных микроскопов).

Имеем

$$0,5 \cdot D' = -f_M \cdot \operatorname{tg} \sigma_A,$$

где σ_A – апертурный угол в пространстве предметов.

При наличии в пространстве предметов иммерсии (жидкости с показателем преломления $n > 1$), числовая передняя апертура микроскопа

$$A = n \cdot \sin \sigma_A$$

$$-f'_M \cdot n = f_M; \quad D' = 2 \cdot n \cdot f'_M \cdot \operatorname{tg} \sigma_A, \left(-\frac{f'}{f} = \frac{n'}{n} \right)$$

При абберрационном расчете микрообъектива обеспечивается его апланатическая коррекция, по условию синусов имеем

$$D' = 2 \cdot f'_M \cdot n \cdot \sin \sigma_A = 2 \cdot A \cdot f'_M.$$

Окончательно получим

$$D' = \frac{500 \cdot A}{\bar{\Gamma}_M},$$

где $\bar{\Gamma}_M = -\frac{250 \cdot n}{f_M}$.

При наблюдении в микроскоп зрачок глаза нужно совмещать с выходным зрачком микроскопа. Следует иметь в виду, что выходной зрачок микроскопа меньше выходного зрачка глаза, в микроскопе учитывают дифракционные явления.

12.4. Разрешающая способность микроскопа

Согласно дифракционной теории Аббе, линейный предел разрешения микроскопа – это минимальное расстояние между точками предмета, которые изображаются как отдельные (рис.12. 3).

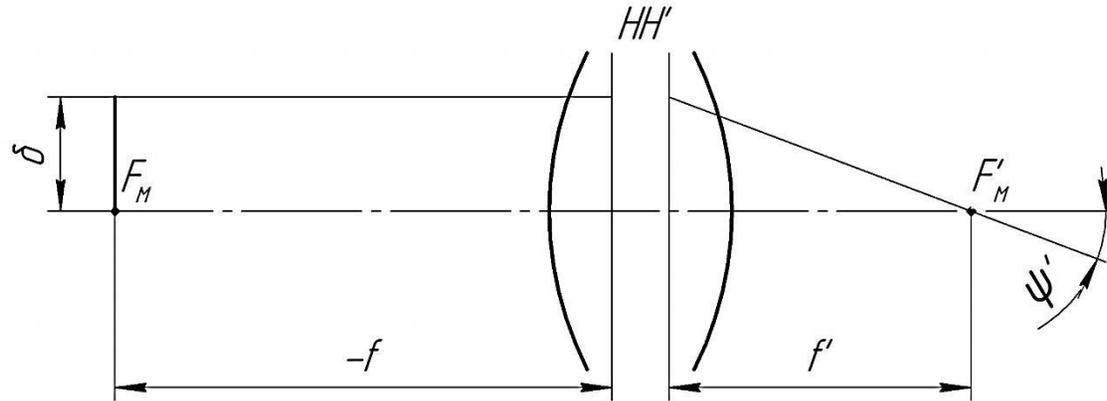


Рис.12.3. Линейная и угловая разрешающая способность микроскопа

$$\delta = \frac{\lambda}{2 \cdot A}, \quad (12.9)$$

где λ – длина волны света, в которой проводится наблюдение.

Для повышения разрешающей способности микроскопа необходимо уменьшать длину волны света и увеличивать числовую апертуру микроскопа. Первая возможность реализуется путем фотографирования исследуемых предметов в ультрафиолетовой области.

Вторая возможность: увеличение апертуры. У современных высококачественных микроскопов значение апертурного угла доведено практически до предельно высоких значений.

$$A = n \cdot \sin \sigma_A, \text{ где } \sin \sigma_A < 1.$$

Применяют иммерсионную жидкость, помещенную между рассматриваемым предметом и микрообъективом (показатель преломления воды $n \approx 1.33$, кедрового масла $n \approx 1.52$, монобромнафталина $n \approx 1.7$.)

Чтобы глаз наблюдателя мог использовать всю разрешающую способность микроскопа необходимо иметь соответствующее видимое увеличение, называемое *полезным*. Угловое разрешение микроскопа в пространстве изображений:

$$\Psi' = \frac{\delta}{f'} = \frac{\lambda \cdot \Gamma_M}{2 \cdot A \cdot 250} \geq \Psi_{\text{гл}}$$

Глаз наблюдателя будет воспринимать точки в передней фокальной плоскости оптической системы раздельно, если угловое расстояние между ними будет не меньше углового предела разрешения глаза $\Psi_{\text{гл}}$ т.е.

$$\Psi' = \frac{\delta}{f'} \geq \Psi_{\text{гл}}$$

$$\Psi' = \frac{\lambda \cdot \Gamma_M}{2 \cdot A \cdot 250} \rightarrow \Gamma_M = \frac{500 \cdot A}{\lambda} \cdot \Psi'$$

Формула для расчета полезного видимого увеличения:

$$\Gamma_M \geq \frac{500 \cdot A}{\lambda} \cdot \Psi_{\text{гл}} \quad (12.10)$$

По формуле (12.10) можно определить min видимое увеличение, при котором глаз будет полностью использовать разрешающую способность микроскопа.

Во многих случаях для микроскопов выходной зрачок $D' = 1 \div 0.5\text{мм}$, это приводит к увеличению углового предела разрешения глаза до $2-4'$.

При $\lambda = 0,55 \cdot 10^{-3}\text{мм}$ и $\Psi_{\text{гл}} = 0,0006 \div 0,0012$ полезное видимое увеличение определено выражением

$$500 \cdot A < \Gamma_M < 1000 \cdot A$$

Микроскоп с видимым увеличением меньше $500 \cdot A$ не позволяет различать глазу все тонкости структуры предмета, которые изображаются микрообъективом как отдельные при данной апертуре A . Использование $\Gamma_M > 1000 \cdot A$ нецелесообразно, т.к. нельзя выявить более мелкую структуру предмета по сравнению с той, которая различается при полезном увеличении.

Линейная разрешающая способность	$\delta = \frac{\lambda}{2A}$	
Передняя числовая апертура микроскопа	$A = n \cdot \sin \sigma $	12.11

13. ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЛУПЫ

13.1. Основные характеристики

Лупа – оптическая система, состоящая из линзы или системы линз, предназначенных для наблюдения предметов, расположенных на конечном расстоянии.

Основные характеристики: видимое увеличение Γ , линейное поле $2y$, диаметр выходного зрачка D' . Если рассматриваемый предмет расположен в передней фокальной плоскости лупы, то от любой точки предмета в глаз наблюдателя попадают пучки параллельных лучей. В этом случае наблюдатель рассматривает предмет без аккомодации.

13.2. Видимое увеличение лупы

Видимое увеличение лупы – отношение тангенса угла, под которым виден предмет через лупу, к тангенсу угла, под которым наблюдается предмет невооруженным глазом.

При отсутствии аккомодации глаза

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg}\omega'}{\operatorname{tg}\omega} = \frac{250}{f'} \quad (13.1)$$

Расчет видимого увеличения при наличии аккомодации.

Рассматриваемый предмет может быть расположен на некотором расстоянии z от передней фокальной плоскости лупы (для нормального глаза $z \geq 0$). Получаемое после лупы изображение предмета y' рассматривается глазом, аккомодированным на конечное расстояние p' (рис.13.1). Имеем

$$p' = z' - z'_p; \quad y' = -y \frac{z'}{f'}$$

Угол поля зрения $\operatorname{tg}\omega' = \frac{y'}{-p'} \beta = \frac{y'}{y} = -\frac{z'}{f'}$. Окончательно

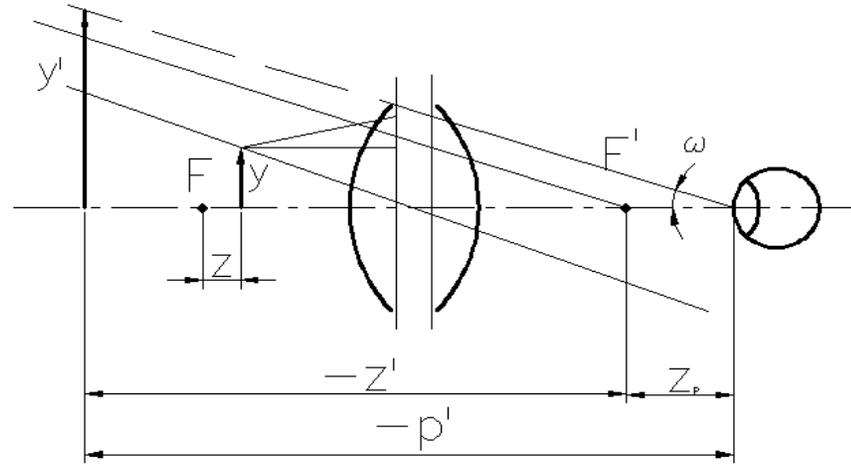


Рис.13.1.Работа лупы при наличии аккомодации глаза

$$\operatorname{tg} \omega' = \frac{y}{f'} \left(1 + \frac{z'_p}{z' - z'_p} \right)$$

Следовательно, при аккомодации глаза

$$\Gamma_{\text{ак}} = \frac{250}{f'} \left(1 + \frac{z'_p}{z' - z'_p} \right) \quad (13.2)$$

При $z' = \infty$, $z = 0$, $z = 0$, $\Gamma = \frac{250}{f'}$.

Видимое увеличение лупы	$\Gamma = \frac{tg \omega'}{tg \omega}$	13.3
Поле зрения лупы	$tg \omega' = \frac{y}{f'}$ $tg \omega = \frac{y}{250}$ $tg \omega' = \frac{y}{f'} \cdot \left(1 + \frac{z'_p}{z' - z'_p}\right)$	13.4
Видимое увеличение при наличии аккомодации	$\Gamma_{ак} = \frac{250}{f'} \left(1 + \frac{z'_p}{z' - z'_p}\right)$	

13.3. Расчет углового поля зрения при наличии виньетирования

Ограничение пучков следует рассматривать в системе «лупа-глаз». Глаз считается неподвижным и аккомодирован на бесконечность.

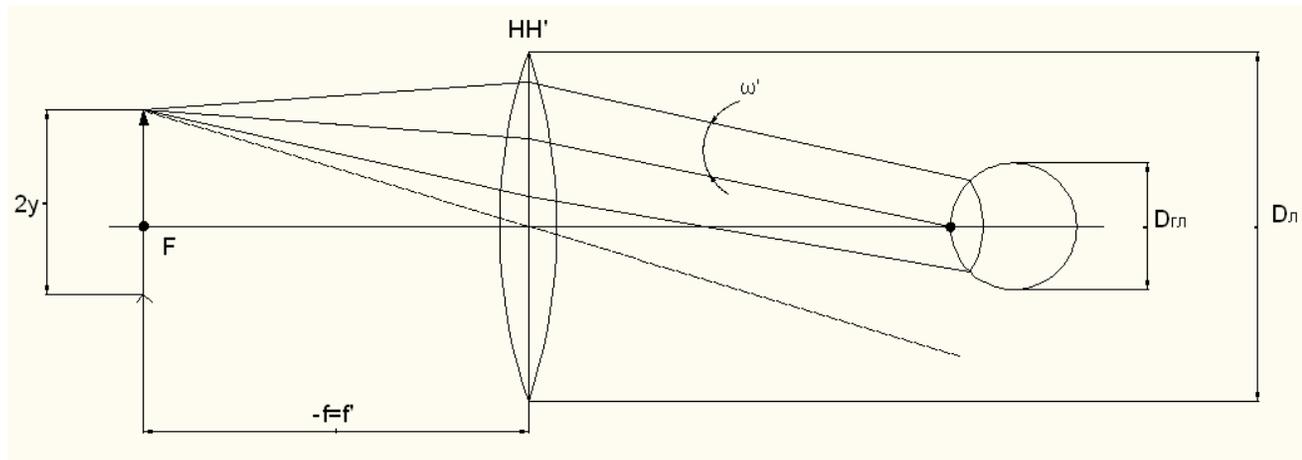


Рис. 13.2. Поле зрения лупы

Обычно $D_{л} > D_{гл}$, поэтому выходным зрачком системы «лупа-глаз» является зрачок глаза $D = D_{гл}$.

В большинстве случаев в передней фокальной плоскости лупы нет полевой диафрагмы, т.е. поле лупы резко не определено. Оправа линзы является виньетирующей диафрагмой (ВД).

Угловое поле лупы при отсутствии виньетирования определяется лучом, идущим через верхний край ВД и верхний край выходного зрачка, т.е.

$$tg\omega' = \frac{D_{л} - D_{зл}}{2t'}$$

и соответственно

$$2y = 2f'tg\omega' = f'\frac{D_{л} - D_{зл}}{t'}$$

откуда следует, что для увеличения линейного поля лупы, глаз следует располагать как можно ближе к лупе. За пределами круга $2y$ имеет место виньетирование поля пучков лучей.

Виньетирование 50% $\omega'_1: tg\omega'_1 = \frac{D_{л}}{2t'}$

Полное виньетирование $\omega'_2: tg\omega'_2 = \frac{D_{л} - D_{гзл}}{2t'}$

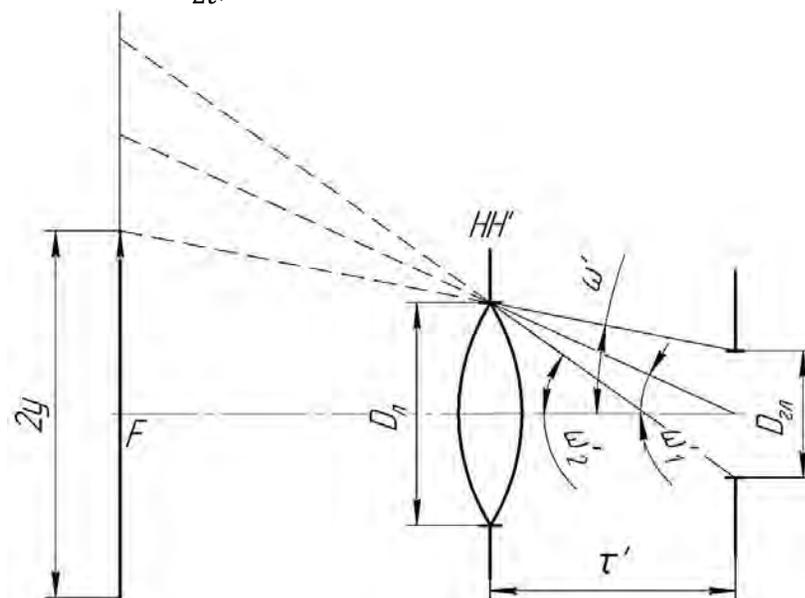


Рис. 13.3. Угловое поле при различном виньетировании

13.4. Типы луп

Характеристики лупы зависят от ее оптической схемы. При видимых увеличениях до $5-7^x$ конструкция лупы выполняется в виде одиночной линзы. Диаметр линейного поля 2ω с удовлетворительным качеством изображения для одиночной линзы не превышает $0,2f'$. Можно использовать 2 одиночные линзы $d=0$.

Используется наблюдение через одну линзу и две сразу, т.е. имеем три увеличения:

$$\overline{\Gamma}_1, \overline{\Gamma}_2 \text{ и } \overline{\Gamma}_3 = \overline{\Gamma}_1 + \overline{\Gamma}_2,$$

где $\overline{\Gamma}_1$ и $\overline{\Gamma}_2$ видимые увеличения первой и второй линзы.

Увеличение значений характеристик лупы возможно за счет усложнения ее оптической схемы, что создает более широкие возможности для коррекции аберраций.

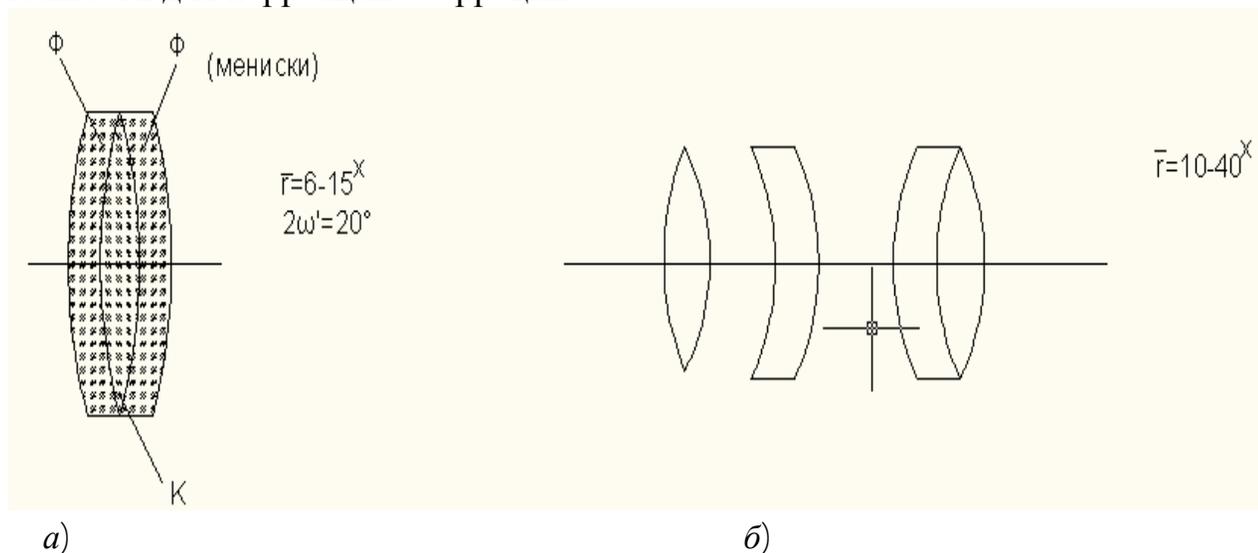


Рис.13.4 Типы луп: а) апланатическая лупа Штейнгеля б) четырехлинзовая анастигматическая лупа

14. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЛАЗА, КОРРЕКЦИЯ ЗРЕНИЯ

14.1. Строение глаза

Глаз, как оптическая система, преобразует энергию оптического излучения в зрительные ощущения. Строение глаза – шаровидное тело, покрытое непрозрачной оболочкой склерой 10 (рис.14.1).

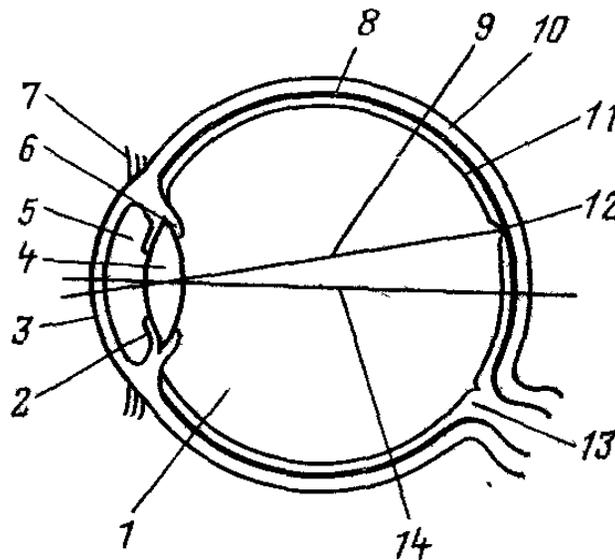


Рис. 14.1. Глазное яблоко

Свет проникает в глаз через отверстие в радужной оболочке (зрачок 2). В передней части находится роговица 3. Двоковыпуклая эластичная линза (хрусталик 4) разделяет внутреннюю полость глаза на переднюю камеру 5, заполненную водянистой влагой и заднюю 1, заполненную стекловидным телом. Мышцы 6 цилиарного тела изменяют кривизну поверхностей хрусталика. Внутренняя поверхность задней камеры покрыта сетчаткой 11. Между сетчаткой и склерой находится тонкая сосудистая оболочка 8, состоящая из сети кровеносных сосудов. Сетчатка является разветвлением зрительного нерва, место входа которого представляет собой слепое пятно 13. В сетчатке расположены сверхчувствительные элементы, являющиеся окончаниями зрительного нерва; в пределах слепого пятна светочувствительные элементы отсутствуют. Несколько выше этого пятна расположено

желтое пятно 12, ограниченное овалом (6° поля зрения). В средней части желтого пятна находится центральная ямка ($2,5^\circ$ поля), *участок наиболее ясного видения*. Линия 9, проходящая через центр желтого пятна и заднюю угловую точку глаза, называется *зрительной осью*; отклонена от оптической оси 14 на угол около 5° . Диаметр зрачка глаза изменяется от 1,5 до 8 мм. Глазное яблоко может вращаться в пределах углов $40\text{--}50^\circ$, выполняя сканирование наблюдаемого предмета. Расстояние между центрами зрачков – глазной базис, у взрослого 58–72мм. При наблюдении близко расположенных предметов глаза поворачиваются так, что их зрительные оси составляют некоторый угол – угол конвергенции (*max* 32°).

14.2. Оптическая система глаза

Она является комбинацией из двух линз – роговицы и хрусталика, разделенных полостью камеры, заполненной водянистой средой (влажгой). *Показатели преломления*: роговицы (1,376), водянистой влаги и стекловидного тела (1,336), хрусталика (1,386). *Параметры глаза* приведены в таблице 13.1.

Таблица 13.1

Радиусы поверхности хрусталика (мм)	В покое	При наибольшем напряжении
Передней (мм)	10	5,33
Задней (мм)	-6	-5,33
Оптическая сила глаза (дптр)	58,64	70,57
Увеличения в зрачках	0,909	0,941
Фокусное расстояние		
Переднее (мм)	-17,055	-14,169
Заднее (мм)	22,785	18,930

Оптическую силу глаза определяет заднее фокусное расстояние, которое может изменяться \approx на 20%. Эта способность глаза называется *аккомодацией*. Точка предмета, которую видит глаз при аккомодации на бесконечность, называется *дальней точкой ясного зрения*. При наибольшем напряжении аккомодационных мышц глаза $f' = 18,93$ мм глаз видит точку *Б* (*ближняя точка ясного зрения*), отстоящую от вершины первой поверхности роговицы на 92 мм.

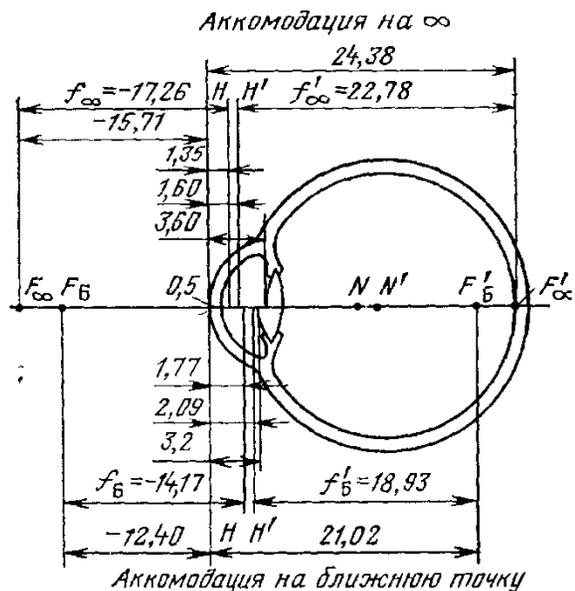


Рис. 14.2. Схематический глаз

Объём аккомодации – расстояние между этими точками в диоптриях (для схематического глаза 11 дптр).

Расстояние наилучшего зрения для нормального глаза при хорошем освещении 50 лк равно 250мм. Глаз имеет большой угол обзора, достигающий 125° по вертикали и 150° по горизонтали, однако лишь небольшая его часть обеспечивает резкое изображение. Эта часть определяется областью жёлтого пятна ($6-8^\circ$).

Предел разрешения глаза

$$\Psi = \frac{140''}{D} \quad (14.1)$$

В расчетах принимают диаметр зрачка $D=1,5-2,5$ мм; увеличение Ψ только до $D = 3-4$ мм; далее сказываются aberrации глаза, и Ψ падает.

Острота зрения – способность глаза видеть раздельно два предмета, расположенных близко друг от друга (Ψ в угловых минутах). $S = 0,5 \div 3$.

$$S = \frac{1}{\Psi} \quad (14.2)$$

Глаз человека реагирует на большой перепад яркостей: от 10^{-7} до 10^5 кд/м². Способность глаза приспосабливаться к различной интенсивности светового воздействия называется *зрительной адаптацией*.

14.3. Недостатки зрения

Глаз называется нормальным (эмметропическим), если его дальняя точка лежит на бесконечности. Зона аккомодации: от ближней точки до ∞ . Если дальняя точка не лежит на ∞ , глаз называется *аметропическим*. Аметропия выражается в диоптриях и равна

$$A_D = \frac{1000}{a_D} \quad (14.3)$$

a_D – расстояние от роговицы до дальней точки D .

Существует два вида аметропии:

- а) близорукость или миопия (отрицательный отрезок a_D);
- б) дальнозоркость, гиперметропия (дальняя точка лежит справа от глаза).

Причиной аметропии часто служит неправильная длина глазного яблока или неправильная форма роговицы или хрусталика.

Астигматизм глаза – изображение взаимно-перпендикулярных прямых линий не получают одинаково резкими из-за неодинаковой оптической силы глаза в разных направлениях.

Для коррекции аметропии к близорукому глазу приставляют отрицательную линзу, задний фокус которой $F'_л$ размещен в дальней точке ясного зрения D .

$$f' = a_D + d, \quad (14.4)$$

где d – расстояние от линзы до роговицы.

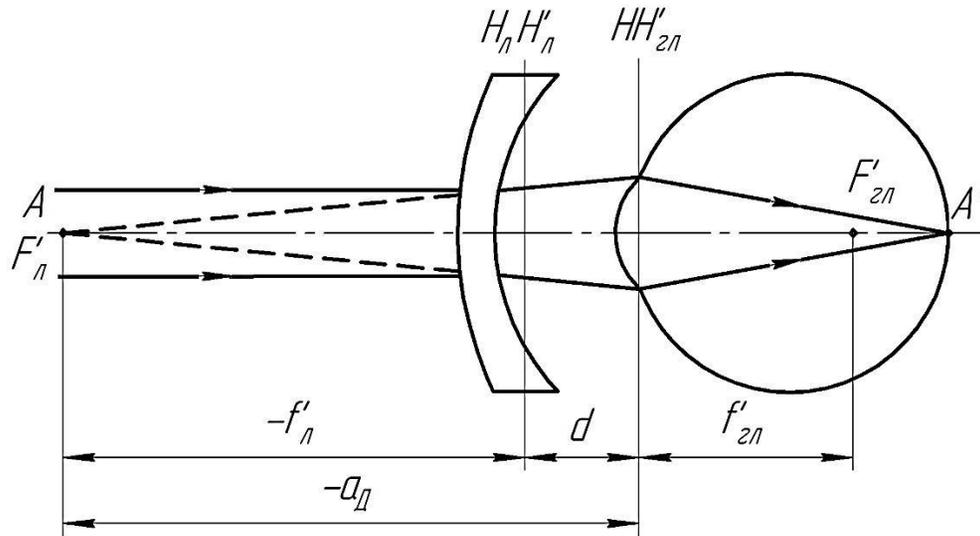


Рис. 14.3. Глаз с очковой линзой

Рефракция очковой линзы, коррегирующей аметропию, рассчитывается по формуле:

$$D = \frac{1000}{f'_л} = \frac{1000}{\frac{1000}{A_D} + d}$$

Для коррекции астигматического глаза линза должна иметь разную рефракцию во взаимно перпендикулярных сечениях, т.е. она должна быть иметь цилиндрические или торические поверхности.

Разрешающая способность	$\psi = \frac{140''}{D}$	
Рефракция линзы	$D = \frac{1000}{f'} = \frac{A_D}{1 + \frac{A_D}{1000} \cdot d}$	14.5

15. ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

15.1. Оптические характеристики фотообъективов

Фотографическим объективом называется оптическая система, образующая действительное изображение предметов на светочувствительном слое фото- и киноплёнок, поверхности фотокатода или светочувствительной передающей трубки и т.д.

Особенность проектного расчета – в фотообъективе должны быть исправлены все аберрации.

Основные оптические характеристики: фокусное расстояние f' ; относительное отверстие D/f' ; угловое поле зрения 2ω .

Другие важные характеристики – разрешающая способность, функция передачи модуляции (ФПМ), распределение освещённости по полю изображения (функция светораспределения), спектральная характеристика пропускания света, интегральный коэффициент пропускания света, светорассеяние и пр.

1. Фокусное расстояние f' фотообъектива определяет масштаб изображения, длину системы и её светосилу. В современных фото- и кинообъективах f' колеблется от нескольких миллиметров до метра.

При съёмке удалённых объектов их изображение получается уменьшенным $y' = -f' \operatorname{tg} \omega$.

При съёмке близко расположенных объектов, изображение определяется линейным увеличением β (масштаб изображения):

$$-z'/f' = -f/z = \beta$$

При одинаковом расстоянии z до предмета его изображение $y' = y\beta$ будет тем больше, чем больше f' . Для крупномасштабных съёмок требуют длиннофокусные объективы.

По фокусному расстоянию различают:

- короткофокусные объективы, для которых $f'/2y' \leq 0,9$ ($2y'$ – диагональ кадра);
- длиннофокусные $f'/2y' \geq 1,5$;
- нормальные $0,9 \leq f'/2y' \leq 1,5$.

Фокусное расстояние современных объективов колеблется от нескольких мм до метра.

Примеры: ОКС-7 ($f'=7$ мм), МТО-1000 ($f'=1000$ мм).

Кроме объективов с $f' = \text{const}$, существуют фотообъективы с непрерывно изменяющимся фокусным расстоянием f . Такие объективы называют *панкратическими* (вариообъективы и трансфокаторы).

Величина изображения	$y' = -f' \cdot \operatorname{tg} \omega$	
Масштаб изображения	$\beta = \frac{-f}{z}$	15.1
Перепад фокусных расстояний	$m = \frac{f'_{max}}{f'_{min}}$	
Освещенность изображения осевой точки	$E' = \frac{\pi \cdot \tau \cdot L}{4} \cdot \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \cdot \left(\frac{\beta_p}{\beta_p - \beta}\right)^2$	15.2
Светосила	$H = \frac{E'}{L}$	
Эффективное диафрагменное число	$k_{\text{эф}} = \frac{f'}{D \cdot \sqrt{\tau}}$	15.3
Освещенность изображения внеосевых точек	$E'_{\omega} = k_{\omega} \cdot E'_0 \cdot \cos^4 \omega'$	
Угловое поле зрения	$\operatorname{tg} \omega' = \frac{l_k}{f'}$ $\operatorname{tg} \omega'_r = \frac{b_k}{2 \cdot f'}$ $\operatorname{tg} \omega'_B = \frac{h_k}{2 \cdot f'}$ $\operatorname{tg} \omega' = \sqrt{\operatorname{tg}^2 \omega'_B + \operatorname{tg}^2 \omega'_r}$	15.4
Критерий добротности	$C_m = \frac{\operatorname{tg} \omega}{k} \cdot \sqrt{\frac{f'}{100}}$	15.5
Масштаб съемки	$ \beta = \left \frac{-L}{2f'} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - 4 \frac{f'}{L}} \right) + 1 \right $	

Дистанция съёмки	$L = f' \cdot \left(2 - \beta - \frac{1}{\beta} + \frac{\Delta_{HH'}}{f'} \right)$	15.6
Подвижка объектива для фокусировки	$z' = \frac{L}{2} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{f'}{L}} \right) - f'$	15.7
Глубина резкости изображения	$\Delta z' = \pm k \cdot \delta'$	15.8
Сдвиг изображения подвижных предметов за время экспонирования	$\delta \cdot l' = v \cdot \beta \cdot t$	

2. Относительное отверстие D/f' определяет освещённость изображения и, соответственно, светосилу. Освещённость изображения осевой точки

$$E' = \frac{\tau \pi L}{4k^2} \left(\frac{\beta_p}{\beta_p - \beta} \right)^2$$

При $S = \infty$, линейное увеличение равно нулю ($\beta = 0$)

$$E' = \frac{\tau \pi L}{4} \left(\frac{D}{f'} \right)^2 = \frac{\tau \pi L}{4k^2}$$

При $\frac{\tau \pi}{4} = const$ светосила $H = \frac{E'}{L}$ зависит от квадрата относительного отверстия.

По светосиле различают:

- геометрическую светосилу $\left(\frac{D}{f'} \right)^2 = \frac{1}{k^2}$;
- физическую светосилу $\tau \left(\frac{D}{f'} \right)^2 = \frac{1}{k_3^2}$.

Относительное отверстие объектива, определяемое с учётом коэффициента τ , называется *эффективным*

$$k_3 = \frac{f'}{D\sqrt{\tau}} = \frac{k}{\sqrt{\tau}}$$

В оптической отрасли приняты числа 1:0,7; 1:1; 1:1,4; 1:2; 1:2,8 ... 1:5,6 ... 1:16 и т.д. Этот ряд составлен при изменении k в $\sqrt{2} = 1,41$ раз, когда освещённость уменьшается в этом вдвое.

Освещённость изображения внеосевых точек зависит от виньетирования:

$$E'_\omega = k_\omega E' \cos^4 \omega', \quad (15.9)$$

где ω' – угол поля зрения в пространстве изображений, k_ω – коэффициент виньетирования.

В зависимости от k различают:

- сверхсветосильные $k < 1,4$
- светосильные $1,4 \leq k < 2,8$
- нормальные $2,8 \leq k < 5,6$
- несветосильные $5,6 \leq k$

Относительное отверстие объективов изменяют с помощью ирисовой диафрагмы, расположенной обычно в межлинзовом промежутке и служащей *апертурной диафрагмой* АД.

3. Угловое поле зрения в пространстве изображения $2\omega'$ – участок, захватываемый объективом и наблюдаемый в видоискателе, определяет формат снимка. Определяется фокусным расстоянием объектива. Широкоугольный объектив (объектив с малым фокусным расстоянием), обладающий большим углом зрения, позволяет включать в кадр участок сцены большей площади, чем нормальный (штатный) объектив или телеобъектив (объектив с большим фокусным расстоянием или длиннофокусный объектив).

$$2\omega' = 2 \arctg(l_k/f'),$$

где $2l_k$ – размер диагонали; $2l_k = \sqrt{h_k^2 + b_k^2}$.

Кадровое окно является полевой диафрагмой ПД.

Главный луч, определяющий поле зрения, проходит через центр АД и центры зрачков (рис.15.1).

В пространстве предметов:

$$\tg \omega = \tg \omega' \gamma_p,$$

где, $\gamma_p = 1 + a_p/f'$ – угловое увеличение в зрачках.

Для объектива, находящегося в однородной среде при $\gamma_p=1$; $2\omega = 2\omega'$.

Угловые поля в горизонтальной и вертикальной плоскостях равны соответственно $\tg \omega'_r = b_k/2f'$ и $\tg \omega'_e = h_k/2f' = h_k/2f$.

Угловое поле зрения: $tg\omega' = \sqrt{tg^2\omega_e + tg^2\omega_r}$

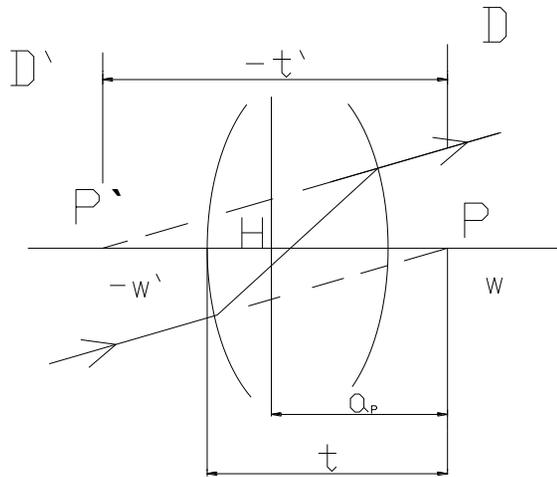


Рис.15.1 Ход главного луча

В зависимости от углового поля $2\omega'$ различают:

- узкоугольные $2\omega' < 40^0$;
- нормальные $40^0 \leq 2\omega' < 60^0$;
- широкоугольные $60^0 \leq 2\omega' < 100^0$;
- сверхширокоугольные $100^0 \leq 2\omega'$.

15.2. Критерий добротности

Критерий добротности фотообъектива C_m зависит от разрешающей способности, от степени падения освещенности по полю изображения, от сложности оптической схемы и т. д..

$$C_m = \frac{tg\omega}{10k} \sqrt{f'} = \frac{Dtg\omega}{f'} \sqrt{\frac{f'}{100}}$$

Для больших групп объективов существует определенная инвариантность характеристик, при которой $C_m = const$.

У современных анастигматов $C_m=0,22 - 0,24$. Разработка фотообъектива не сложна, если $C_m < 0,2$.

15.3. Глубина изображаемого пространства и глубина резкости изображения

Допустимое перемещение плоскости предметов определяет глубину изображаемого пространства при удовлетворительном качестве изображения.

На рис. 15.2 показаны: объектив, плоскость предмета O и плоскость анализа изображения (к примеру, плоскость пленки) O' .

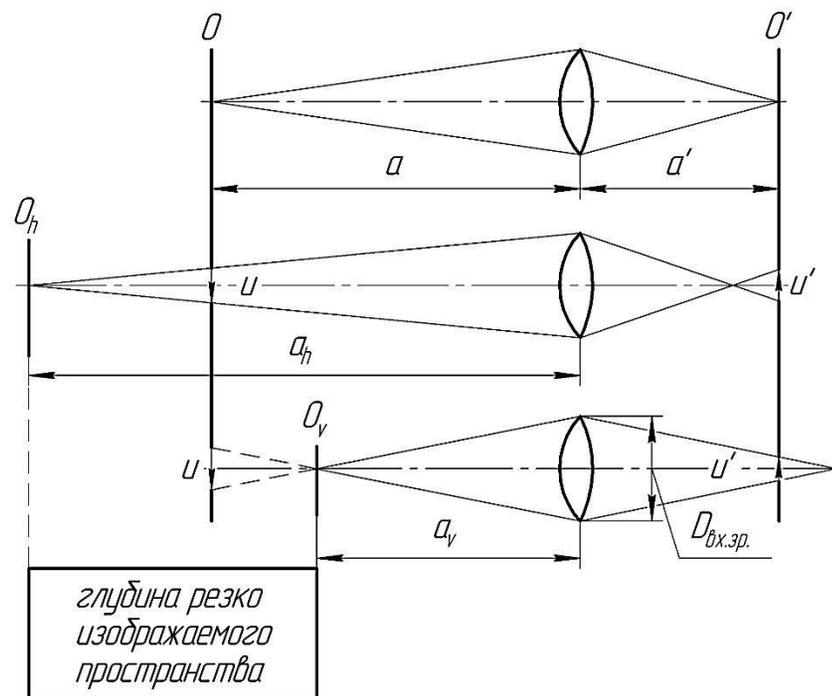


Рис.15.2. Пространство предметов у фотообъектива

Положение плоскостей O и O' определяют отрезки a и a' . Гомоцентрический пучок с центром в плоскости O после прохождения объектива сходится в точку, принадлежащую плоскости O' . Изображение в плоскости O' будет резким, когда плоскость O – плоскость наводки на резкость.

Гомоцентрический пучок с центром в точке, лежащей на плоскости O_h (или плоскости O_b), после прохождения объектива в плоскости O' не сохранит гомоцентричности. Точкам в плоскости анализа изображения, которые лежат за или перед плоскостью наводки на резкость, соответствуют кружки нерезкости с диаметром u' .

Для определения границ области резко изображаемого пространства a_v и a_h необходимо задавать допустимые диаметры u' кружков нерезкости с учетом оптических свойств глаза (табл. 15. 1.)

Таблица 15.1. Допустимые диаметры кружков нерезкости

Размер кадра, мм	Диаметр кружка нерезкости u' , мм	Диагональ кадра, мм	Угловой размер кружка
60×90	0,075	108	2,4'
45×60	0,050	75	2,3'
24×36	0,033	43	2,6'
18×24	0,025	30	2,9'
16×22	0,025	27	3,2'
7,5×10,5	0,015	13	4,0'

Если рассматривать изображения с расстояния, равного его диагонали (это справедливо и в том случае, когда рассматривается не сам негатив или слайд, а его увеличенные изображения), то угловой размер кружков нерезкости примерно равен разрешающей способности глаза.

Если построить изображение отрезка u' в обратном ходе лучей, то в плоскости наводки на резкость получим отрезок u . Тогда

$$a_v = \frac{a \cdot D_{\text{ex.зр}}}{D_{\text{ex.зр}} - u}$$

Ближняя граница резко изображаемого пространства равна:

$$a_v = \frac{a \cdot f'^2}{f'^2 - u' \cdot k \cdot (a + f')}$$

где a – расстояние наводки на резкость; f' – фокусное расстояние объектива; k – диафрагменное число; u' – допустимый диаметр кружка нерезкости; $k = f'/D_{\text{ex.зр}}$; $\beta' = f'/(a + f')$; $u' = u \cdot \beta'$.

Дальняя граница резко изображаемого пространства a_h определяется аналогично:

$$a_h = \frac{a \cdot f'^2}{f'^2 + u' \cdot k \cdot (a + f')}$$

Расстояние между плоскостями O_h и O_y определяет *глубину резко изображаемого пространства*. Расстояние $a'_v - a'_h$ – глубина резкости.

Линейное увеличение	$\beta = \frac{f'}{z} = \frac{f'}{s - s_F}$	
Передний план	$p_1 = \frac{p}{1 - \frac{\delta' \cdot (s - s_F)}{f' \cdot D}}$	15.10
Задний план	$p_2 = \frac{p}{1 + \frac{\delta' \cdot (s - s_F)}{f' \cdot D}}$	
Практическая бесконечность	$p_{1\infty} = \frac{-f'^2}{\delta' \cdot k}$	15.11
Гиперфокальное расстояние	$\bar{p}_1 = \frac{-f'^2}{2 \cdot \delta' \cdot k}$	
Глубина резкости изображения	$\Delta p' = 2 \cdot (p' - p'_2) = 2 \cdot \delta' \cdot k$	
Задний апертурный угол	$\operatorname{tg} \sigma' = \frac{D'}{2 \cdot p'}$	
Диаметр выходного зрачка	$D' = D \cdot \beta_p$	

15.4. Разрешающая способность фотообъектива

Разрешающая способность – критерий количественной оценки качества изображения, создаваемого оптической системой, показывающий, сколько линий или предметных точек может изобразить отдельно фотографическая система на отрезке длиной 1 мм. Разрешающая способность оптической системы определяется наименьшим расстоянием между двумя точками или линиями, видимыми отдельно через данную систему, и оценивается для объектива зрительной трубы в угловой мере, а для фотографического объектива – в линейной.

Изображение точки идеальной оптической системы представляет собой дифракционную картину. Она имеет вид центрального светлого пятна (диск Эри), окруженного системой дифракционных колец. Распределение интенсивности J света приведено на рис 15.3.

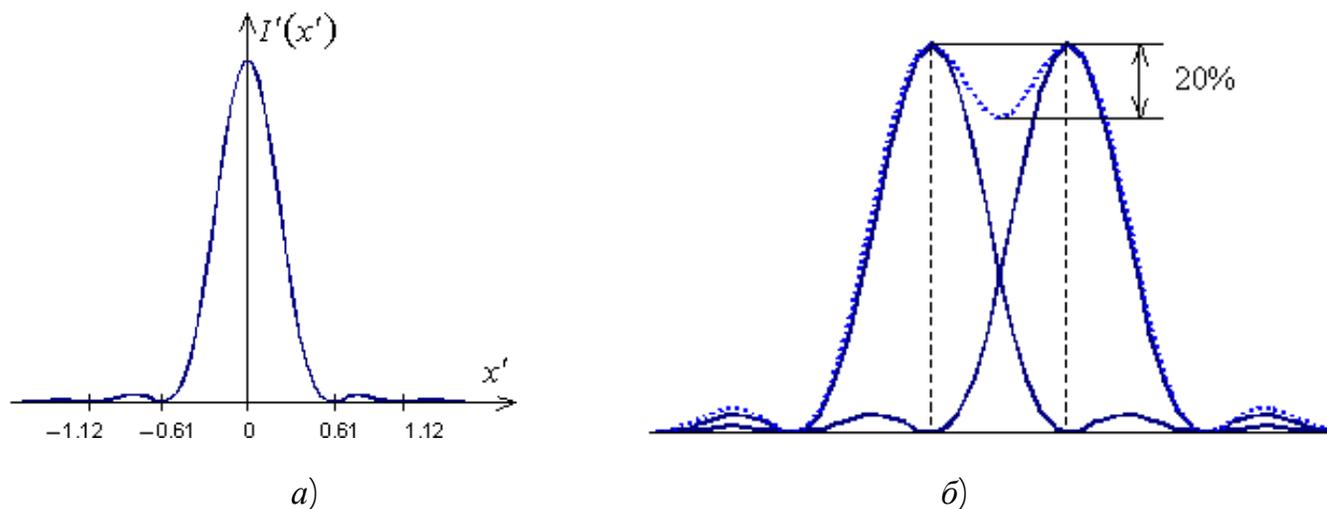


Рис. 15.3. а) – дифракционное изображение точки; б) – разрешение двух дифракционных точек по критерию Рэлея

Угловое расстояние, ψ_{\min} для первого темного кольца, определяется по теоретическому критерию Рэлея:

$$\Psi_{\min} = (1,22/D) \lambda$$

где D – диаметр входного зрачка; λ – длина волны света. *Критерий Рэлея* позволяет количественно определить разрешающую силу различных оптических приборов: изображения двух одинаковых точечных источников све-

та считаются разрешимыми, если центральный максимум дифракционной картины от одного точечного источника совпадает с первым минимумом дифракционной картины от другого (рис 15.3, б).

Различают:

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

Визуальная разрешающая способность для идеального объектива	$N_0 = \frac{1}{\delta'_0}$	
Линейный предел разрешения	$\delta'_0 = \frac{1.22 \cdot \lambda}{D} = 1.22 \cdot \lambda \cdot k$	15.12
Для $\lambda = 0,546$ мкм	$N_0 = \frac{1500D}{f'}$	15.13

Разрешимое угловое расстояние

$$\psi = 140''/D.$$

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 мира 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.

15.5. Частотно-контрастная характеристика

Частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) дает количественную оценку контраста в изображении структур предметов различных частот и помимо разрешающей способности позволяет количественно определить качество изображения. С точки зрения ЧКХ *разрешающая способность* – это частота в изображении периодически расположенных объектов (светящихся точек или штрихов мира), при которой контраст между изображениями объектов и окружающим их фоном находится на границе контрастной чувствительности приемника (глаза, фотоэлемента и т.д.).

ЧКХ определяет отношение контраста изображения k' к контрасту предмета k в зависимости от частоты точек предмета ν . Наиболее просто ЧКХ определяют, если в качестве предмета используют синусоидальную миру, штрихи которой имеют синусоидальное распределение яркости. Изображение такой мира также имеет распределение освещенности по закону \sin . Яркость мира меняется от 0 до какой-то \max величины.

Контраст $k = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}}$ Если $L_{min} = 0$, $k = 1$.

Для каждой ОС существует граничная частота, для которой $T(\nu_{гр}) = 0$; т.е. для всех $\nu \geq \nu_{гр}$ $T(\nu) = 0$.

$$\begin{cases} \nu_{гр} = \frac{2 \sin \sigma'}{\lambda}, \\ \nu_{гр} = \frac{D}{\lambda \cdot f'}. \end{cases} \quad (15.14)$$

где σ' – задний апертурный угол.

Частотно-контрастная характеристика – зависимость контраста изображения \sin мира от ее пространственной частоты при контрасте самой миры, равной 1 (рис.15.4). Чем больше частота миры, тем сильнее падает контраст.

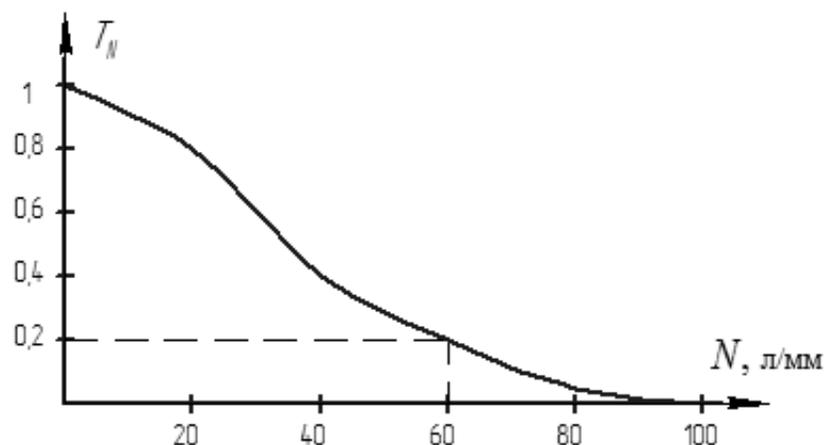


Рис. 15.4. Зависимость контраста изображения периодического тест-объекта от его пространственной частоты (ЧКХ)

Различают дифракционную (ДЧКХ) и геометрическую (ГЧКХ).

ДЧКХ имеет смысл применять для хорошо исправленных систем ($\lambda - 2\lambda$), или если aberrации точки не превышают ее дифракционного изображения. Когда $v \ll v_{gp}$ можно ограничиться ГЧКХ.

Для хорошо исправленных ОС существуют два способа вычисления 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.

Контраст	$k = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}}$	15.15
Коэффициент передачи контраста	$k(N) = \frac{k'}{k}$	
Граничная частота	$\left\{ \begin{array}{l} v_{rp} = \frac{2 \cdot \sin \sigma'}{\lambda} \\ v_{rp} = \frac{D}{\lambda \cdot f'} \end{array} \right.$	
I способ вычисления ГЧКХ	$T(N) = \frac{\sqrt{C^2(N) + S^2(N)}}{C_0^2} C(v) = \int_{-\infty}^{\infty} E(y) \cdot \cos 2\pi \cdot N \cdot y \cdot dy$ $S(v) = \int_{-\infty}^{\infty} E(y) \cdot \sin 2\pi \cdot N \cdot y \cdot dy$ $C_0 = \int_{-\infty}^{\infty} E(y) \cdot dy$	
II способ вычисления ГЧКХ (преобразование Фурье)	$C(v) = \frac{1}{p} \cdot \iint_p \cos 2\pi \cdot v \cdot \Delta \cdot y' \cdot dy \cdot dz$ $S(v) = \frac{1}{p} \cdot \iint_p \sin 2\pi \cdot v \cdot \Delta \cdot y' \cdot dy \cdot dz$	

15.6. Пограничная кривая

Яркость пограничного тест-объекта, распределение яркости которого характеризуется функцией скачка	$L(x) = \begin{cases} L_{max} = 1 \\ L_{min} = 0 \end{cases}$	
Пограничный градиент характеризует способность ОС резко разделять границу светлого и темного полей Средний градиент характеризует контраст изображения	$G_E = tg \alpha_E = \frac{\Delta E}{\Delta x}$ $G_{Ecp} = \frac{E'_B - E'_A}{x'_A - x'_B}$	15.16
Показатель резкости- среднеквадратический градиент	$G^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta E_i}{\Delta x_i}\right)^2}{n}$	15.17
Критерий – совокупная характеристика, учитывающая резкость и контраст изображения	$P_E = (E'_{max} - E'_{min}) \cdot G_E$	15.18
Функция рассеяния линии	$E'_n(x') = \int_0^{\infty} A_L \cdot (x' - x) \cdot dx$ $A_L(x') = \int_{-\infty}^{\infty} A \cdot (x', y' - y) \cdot dy$	
Острота снимка	$A_E = \frac{G_E^2}{E'_B - E'_A}$	15.19
Четкость снимка – величина, определяющая влияние резкости и разрешающей способности на качество снимка	$\Sigma = \log A_E \cdot (1 - e^{-kN_0^2})$	15.20

16. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

16.1. Волновая aberrация

Волновые aberrации применяются для оценки качества изображения ОС. Это линейная величина отклонения истинной формы волновой поверхности (в пространстве изображений) от ближайшей сферы сравнения.

Дифференциальное уравнение волновой aberrации.

$$d\Delta l = (\delta S' - \xi) \sin \sigma d\sigma \quad (16.1)$$

Δl – волновая aberrация; σ – задний апертурный угол.

Интегрируя в пределах $[0, \sigma]$, получим (рис.16. 1):

$$\Delta l = -\xi(1 - \cos \sigma) + \int_0^{\sigma} \delta S' \sin \sigma d\sigma; \quad (16.2)$$

$$P = 1 - \cos \sigma; dP = \sin \sigma d\sigma; \Delta l = -\xi P + \int_0^{\sigma} \delta S' dP.$$

На графике волновая сферическая aberrация Δl – заштрихованная площадь.

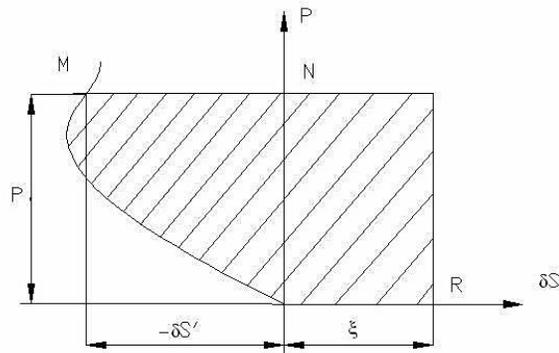


Рис.16.1. График продольной сферической aberrации $\delta S'$

Световое колебание	$S = a \cdot \sin \omega \cdot \left(t - \frac{E}{c} \right)$	
Фаза колебания	$\varphi = \omega \cdot \left(t - \frac{E}{c} \right)$	
Прохождение световой волны	$V = \frac{dN}{dt}$	
Уравнение эйконала	$dE = n \cdot dN$ $\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial x} = \frac{\partial E}{\partial N} \cos(N, x) = n \cdot \cos(N, x) \\ \frac{\partial E}{\partial y} = \frac{\partial E}{\partial N} \cos(N, y) = n \cdot \cos(N, y) \\ \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{\partial E}{\partial N} \cos(N, z) = n \cdot \cos(N, z) \end{cases}$	16.3
Уравнение Эйконала в частных производных	$\left(\frac{\partial E}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial z} \right)^2 = [\cos(N, x)^2 + \cos(N, y)^2 + \cos(N, z)^2] \cdot n^2$	
	$E_2 - E_1 = \int_{S=1}^{S=m+1} n_S \int dN_S = \sum_{S=1}^{S=m+1} n_S \cdot d_S$	
Закон таутохронизма	$\sum_{S=1}^{S=m+1} n_S \cdot d_S = \text{const}$	
Волновая абберация по критерию Релея	$\Delta l \leq \frac{1}{4} \cdot \lambda$	

16.2. Компьютерная оценка качества изображения в программной среде OPAL

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 aberrаций 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 aberrацию 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. 16.2).

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



Рис.16.2 Функция рассеяния точки

Анализ геометрического изображения. Работа предназначена для анализа структуры изображения центрированных оптических систем в геометрическом приближении (без учета дифракции). 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 в ОС нескольких длин волн можно рассчитывать полихроматические характеристики с учетом функции спектральной эффективности или монохроматические характеристики для центральной длины волны (поле «Характеристики <Полихроматические / Монохроматические>»).

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

Частотно-контрастная характеристика (MTF) – один из основных параметров оценки качества ОС, показывающий, насколько резкие изображения способен формировать объектив (рис. 16.3).

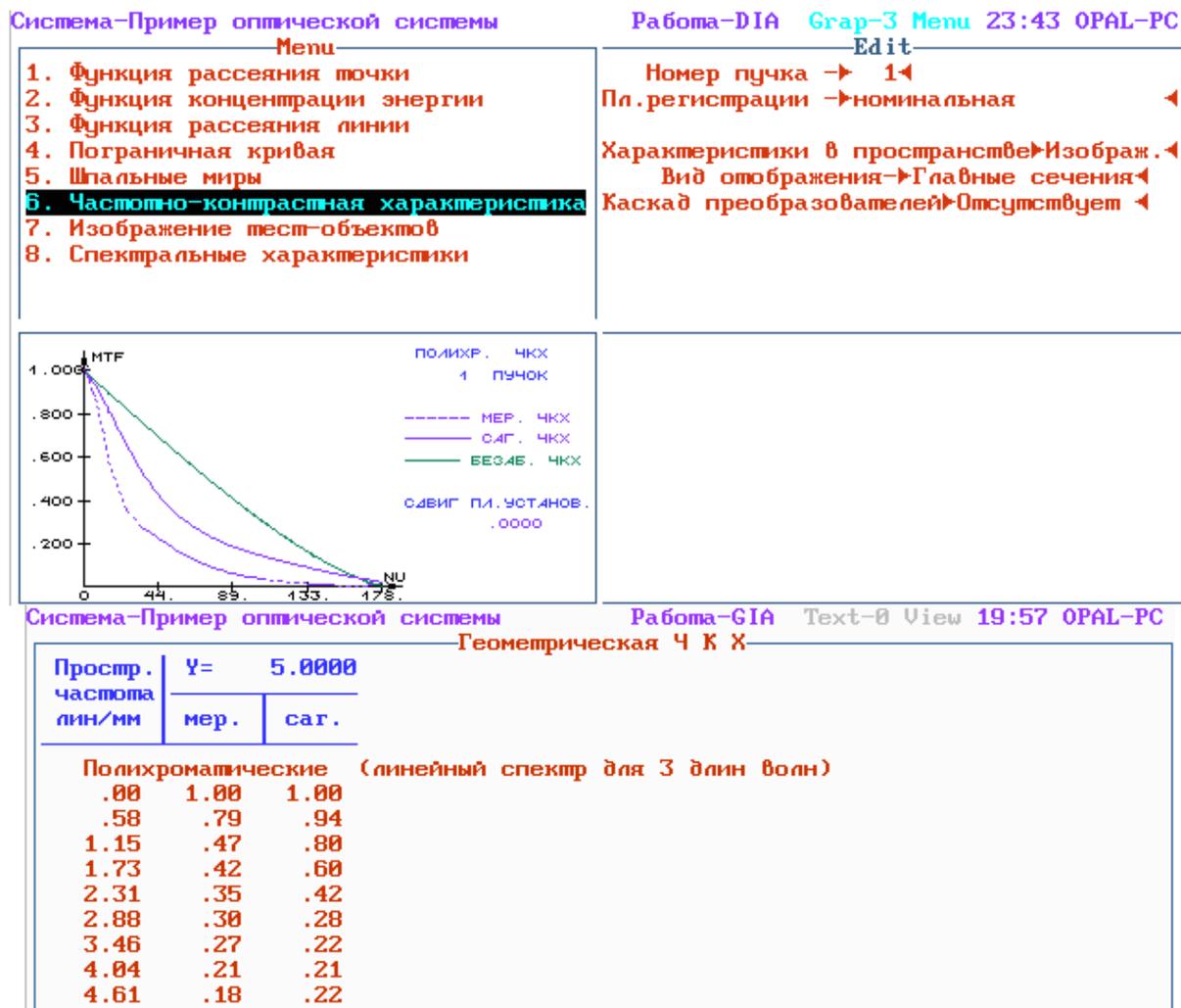


Рис.16.3. Частотно-контрастная характеристика

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».

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 безаберрационная ЧКХ, определяемая с учетом дифракции.

Точечная диаграмма лучей – ТД картина точек пересечения лучей, равномерно распределенных по зрачку, с плоскостью изображения (рис. 16.4). ТД может выводиться для одного пучка или для всех пучков.



Рис.16.4. Точечная диаграмма

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».

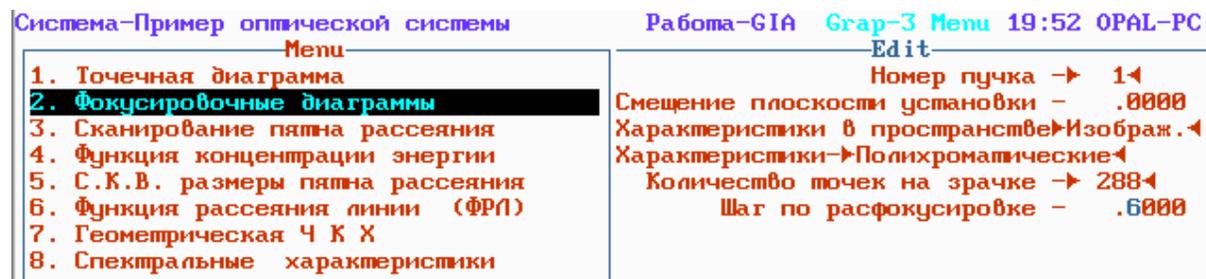
Фокусирующие диаграммы характеризуют изменение точечных диаграмм при сдвиге плоскости изображения. Для всех пучков выводятся ТД для номинальной плоскости установки и для четырех сдвинутых на расстояния $\pm DS$ и $\pm 2 \cdot DS$ плоскостей (рис.16.5).



Рис.16.5. Фокусировочные диаграммы

Величина сдвига DS' задается в поле «Шаг по расфокусировке» окна «Edit» (рис.16.6). Остальные настройки этого пункта стандартные для работы «Анализ геометрического изображения».

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



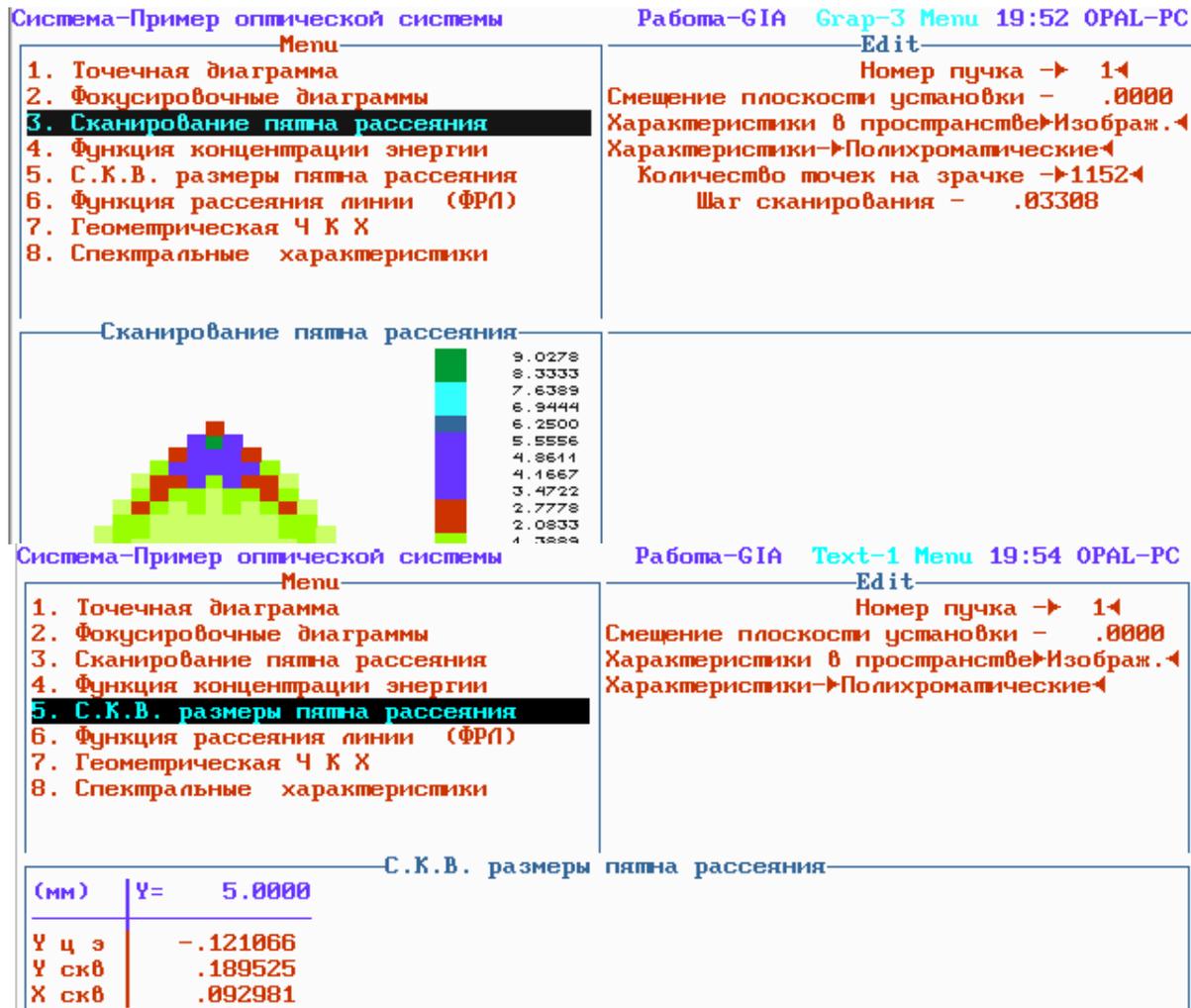


Рис.16.6. Окно «Edit»

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.16.7). 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.16.7).

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

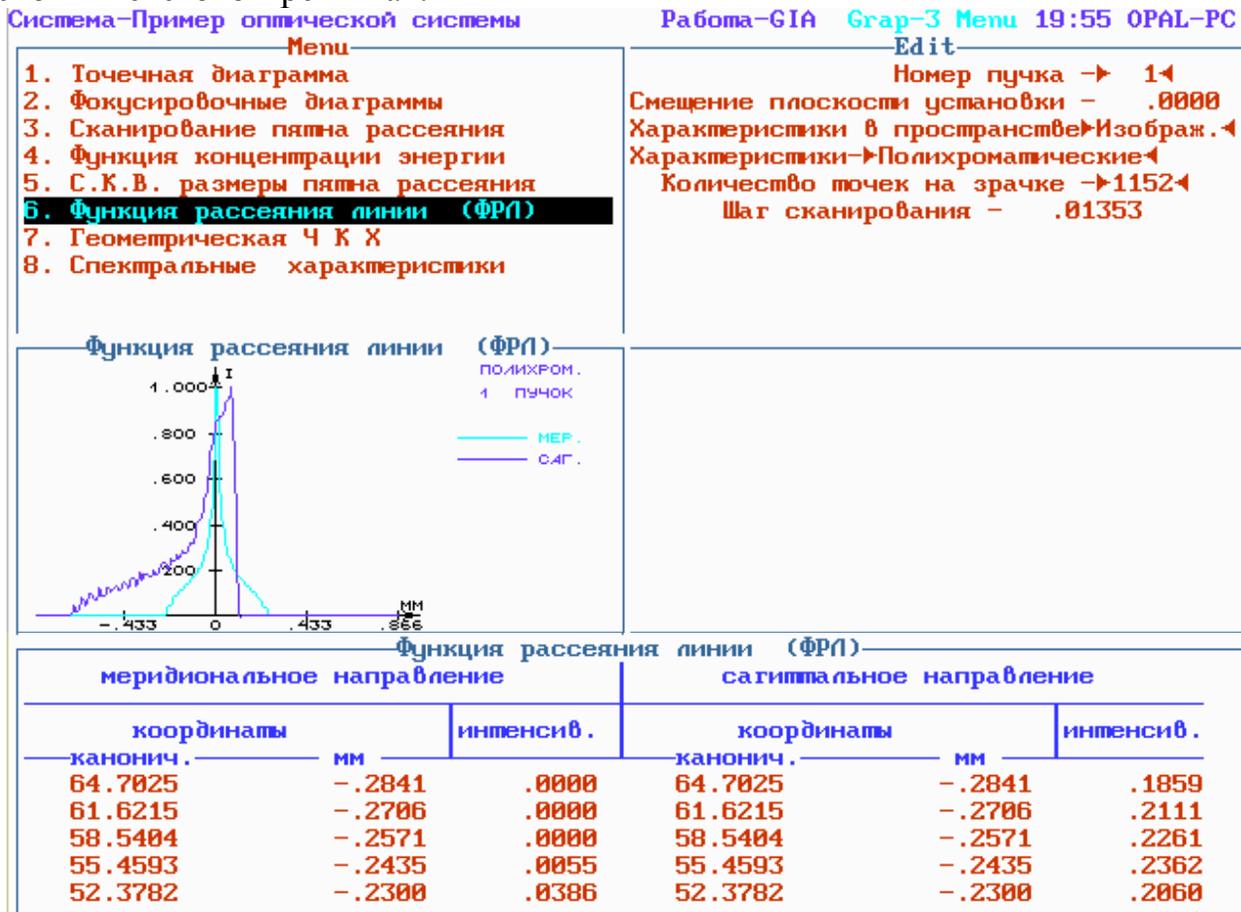


Рис.16.7. Функция рассеяния линии

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.

В графическом режиме функция спектральной эффективности отображается в виде графика (16.10).

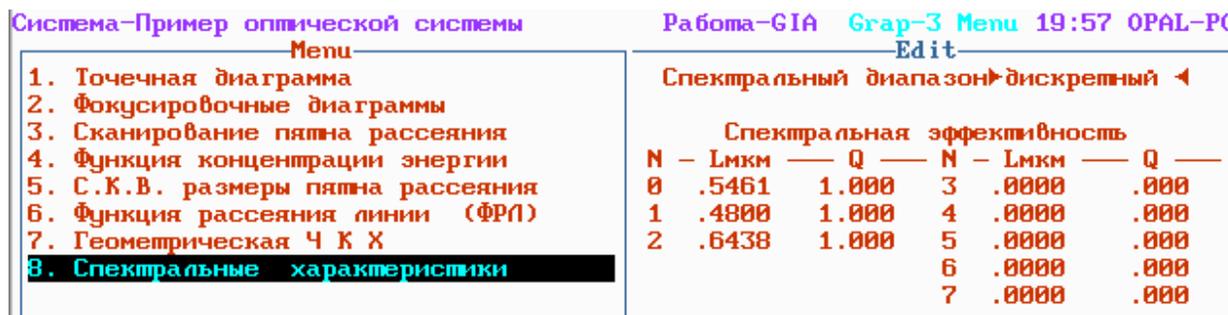


Рис.16.8. Спектральные характеристики

16.3. Современная оценка качества изображения оптической системы

По критерию Релея остаточная сферическая aberrация ОС не оказывает заметного влияния на качество изображения, если оптическая разность хода любой пары лучей из всего пучка не превосходит $\lambda/4$. У многих современных ОС, особенно у светосильных фотографических объективов, оптическая разность хода во много раз превосходит предел, установленный Рэлеем, что объясняется тем, что во многих случаях условия использования изображения допускают большие кружки рассеяния (например, проектирование изображения на экран или фотографирование с уменьшением).

Критерий Штреля для оценки качества изображения использует вычисление освещенности только в центре кружка рассеяния и сравнение этой освещенности с освещенностью центра идеального изображения, даваемого ОС с тем же фокусным расстоянием и относительным отверстием, но без сферической aberrации. Отношение обеих освещенностей, выраженное в процентах, называется «определяющей яркостью» (освещенность в центре принимается 100%). ОС с удовлетворительным качеством изображения по сферической aberrации имеют число (коэффициент) Штреля около 70- 60%. В других случаях число Штреля порядка 50% и ниже; в этих случаях качество изображения точки зависит от того, как распределена энергия между дифракционными кольцами в пятне рассеяния. Недопустимо, когда внешние кольца получают энергию, не попадающую вследствие aberrаций в центральное пятно, и освещенность крайних колец становится сравнимой с освещенностью В центре кружка.

Критерий Г. Г. Слюсарева устанавливает угловое разрешение для «ночных» зрительных труб с диаметром выходного зрачка до 8 мм: качество изображения в центре должно обеспечивать угловое разрешение $2'/\Gamma$ при постепенном ухудшении его до $20'/\Gamma$ на краю поля (при диаметре входного зрачка до 2 мм); для остальной части зрачка допускают увеличение разрешаемых углов до $10'/\Gamma$ в центре поля и $1^\circ/\Gamma$ на краю.

При увеличениях, больших 10^\times , в зрительной трубе начинает сказываться влияние вторичного спектра и сферохроматической аберрации [3].

В широкоугольных ОС с угловым полем, большим 65° , оценивают относительную дисторсию: она должна быть «подушкообразной» и положительной, не более 5% на краю поля изображения (для чего в линзах окуляра используют параболоидальную поверхность).

Критерий А. И. Тудоровского устанавливает «нормальное» увеличение зрительной трубы, равное $0.5D$ согласно технологическому пределу разрешающей способности безабберационного объектива ($\psi=140''/D$) с учетом углового предела разрешения для нормального глаза ($1'$). Возрастание увеличения не приносит пользы для улучшения разрешения.

По Государственному стандарту на бинокли разрешающая способность телескопической системы для точки на оси определяется диаметром выходного зрачка: для диаметра зрачка до 5 мм она равна $120''/D$, а свыше 5 мм – $300''/D$.

Критерий С. В. Елисеева предполагает, что наибольшее влияние на разрешающую способность оказывает хроматизм изображения. Он устанавливает наилучшую разрешающую способность глаза при зрачке с диаметром не более 1,5 мм (обычно разрешающая способность определена $1'$ при зрачке 3 мм [5]); из-за хроматических погрешностей предельный разрешаемый угол для системы падает.

Для панкратических зрительных труб допускается ухудшение качества изображения на 20-30%.

ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1	
ИССЛЕДОВАНИЕ АБЕРРАЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	
Лабораторная работа № 2	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ	
Лабораторная работа № 3	
ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ФОТООБЪЕКТИВОВ	
Лабораторная работа № 4	
ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛАЗА КАК ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ	
Лабораторная работа № 5	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЕКЦИОННЫХ СИСТЕМ	
Лабораторная работа №6	
ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРОПУСКАНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ ОБРАЗЦОВ НА ФОТОМЕТРЕ	
Лабораторная работа № 7	
ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ И СВОЙСТВ ТИПОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ	
Лабораторная работа №8	
ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПАРАКСИАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И АБЕРРАЦИЙ СКЛЕЕННОГО ДВУХЛИНЗОВОГО ОБЪЕКТИВА	
Лабораторная работа №9	
ИССЛЕДОВАНИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ПУЧКОВ В РЕАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	
Лабораторная работа № 10	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЯРКОСТИ ОБЪЕКТОВ	
Требования к выполнению лабораторных работ	
КРАТКОЕ РУКОВОДСТВО ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ ПАКЕТА ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ OPAL - PC	
ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ	
Планы практических занятий	
Требования к выполнению домашних заданий и контрольных работ	
Примеры решения задач	

Задания на самостоятельную работу

Индивидуальные карточки для самостоятельной работы

Упражнения и задачи для самостоятельной работы

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

Цель и задачи курсового проектирования

Содержание курсового проекта и требования к его оформлению

Последовательность выполнения курсового проекта

Оформление технической документации на рассчитанную оптическую систему.

Порядок защиты проекта

КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

Средства диагностики

Критерии оценки результатов учебной деятельности

Контрольные задания по темам учебной дисциплины

Вопросы к экзаменам по дисциплине (теоретическая часть)

Вопросы к экзаменам по дисциплине (практическая часть)

Задачи к экзамену (6 семестр)

Примерный перечень контрольных вопросов к лабораторным работам

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

ВЫДЕРЖКИ ИЗ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ ДИСЦИПЛИНЫ

ГЛОССАРИЙ

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ АБЕРРАЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Цель работы: изучить основные aberrации простой линзы по виду фигуры рассеяния в плоскости изображения. Измерить сферическую aberrацию и хроматизм положения сложного объектива.

Оборудование и принадлежности к работе

Оптическая скамья, осветители, исследуемые оптические системы, экраны, точечная диафрагма зональная диафрагма, светофильтры, измерительные инструменты.

Описание установки и порядок выполнения работы

1. *Исследование сферической aberrации, комы и астигматизма* по виду изображения светящейся точки. Работа производится на установке, изображенной на рис. 1.1.

Работу необходимо производить в следующей последовательности:

а) ознакомиться с установкой и проверить правильность расположения ее отдельных элементов.

б) исследовать вид изображения светящейся точки при *сферической aberrации* в зависимости от величины отверстия линзы; для этого менять диафрагму 5 и, перемещая экран 7 вдоль оптической оси линзы 6, заметить и зарисовать вид и местоположение изображения. По шкале, которая имеется на рельсе установки, измерить продольную сферическую aberrацию. Убрать диафрагму 5 и найти местоположение наиболее резкого изображения, даваемого всей линзой. Зарисовать вид изображения и указать местоположение его относительно изображений, даваемых различными зонами линзы;

в) исследовать *хроматическую сферическую aberrацию*; для этого перед диафрагмой 4 последовательно установить светофильтры, соответствующие линиям C , D и F , и измерить величину aberrаций по пункту «б»;

г) исследовать изображение при наличии aberrации комы в зависимости от величины угла поля зрения. Для этого убрать зональную диафрагму 5 и повернуть линзу вокруг вертикальной оси последовательно на углы 10, 20 и 30°. Зарисовать получающиеся при этом фигуры рассеяния, являющиеся изображением светящейся точки, и примерный характер распределения энергии в этих фигурах;

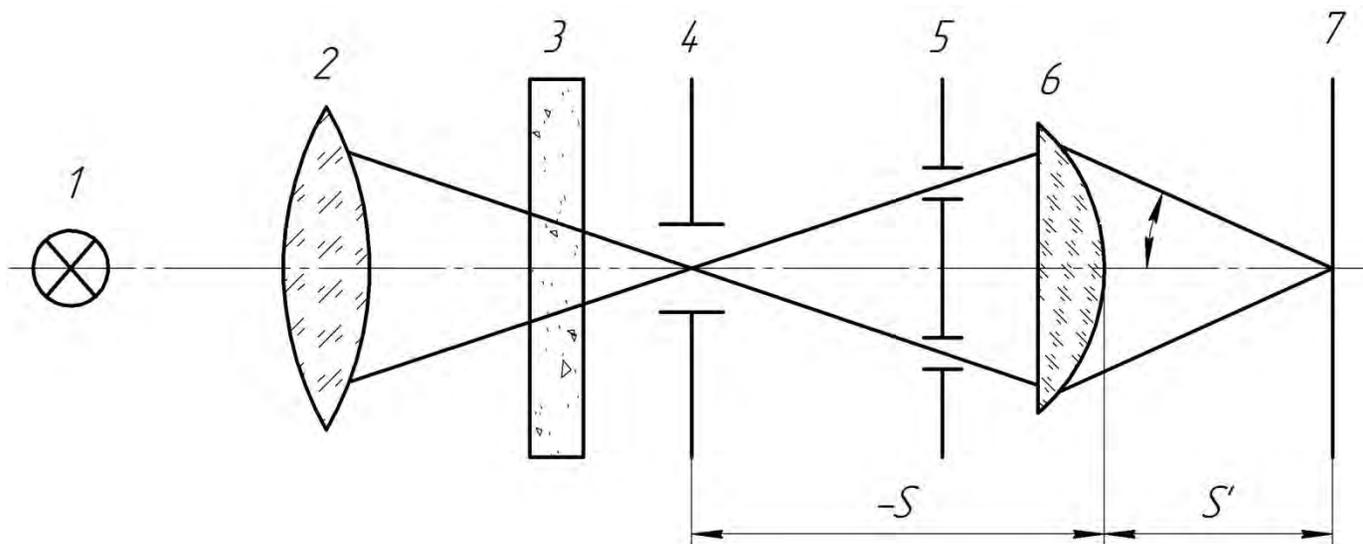


Рис.1.1. Схема установки: 1 – источник света; 2 – конденсор; 3 – рассеивающая среда; 4 – диафрагма с малым отверстием, устанавливаемая в плоскости изображения нити лампы, даваемого конденсором 2; 5 – сменная зональная диафрагма, оставляющая открытой ту или иную зону поверхности линзы; 6 – испытуемая линза, изображающая диафрагму 4 в плоскости экрана 7, имеющего возможность перемещаться вдоль оси

д) исследовать изображение точки при наличии *абберации астигматизма*. Для этого установить зональную диафрагму малого диаметра, получить изображение светящейся точки на экране 7 и заметить по шкале местоположение последнего. Затем повернуть линзу вокруг вертикальной оси на угол $20-30^\circ$ и, перемещая экран по направлению к линзе, а затем – от линзы, зафиксировать постепенное изменение фигуры рассеяния изображения точки до превращения ее в резкую полоску. Заметить по шкале положение экрана, при котором на нем получаются меридиональное и сагиттальное изображение точки. То же проделать для угла наклона линзы 40° . При изменении угла наклона линзы заметить, что меридиональное и сагиттальное изображения светящейся точки находятся на различных расстояниях между собой и от линзы (в этом проявляется *абберация кривизны поверхности изображения*). Показать относительное местоположение параксиального и астигматического изображений соответственно для осевой и внеосевой точек предмета.

2. **Исследование дисторсии.** Установка схематически изображена на рис. 1.2, на котором обозначены: 1 – источник света; 2 – матовое стекло, на котором нарисованы три квадрата; 3,а и 3,б – диафрагмы, поочередно устанавливаемые в положении «а» и «б» перед линзой 4, изображающей матовое стекло на экране 5 за ней.

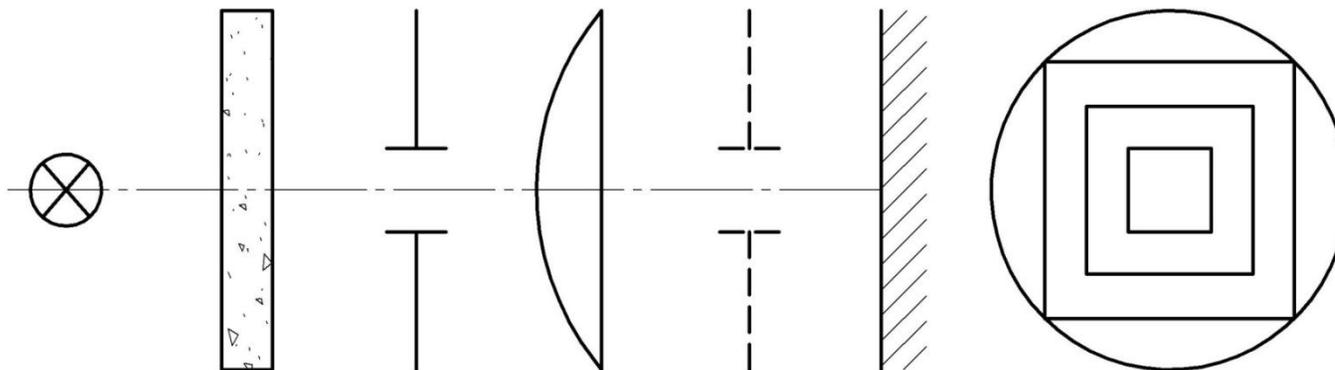


Рис.1.2. Схема установки по исследованию дисторсии

Работу производить в следующей последовательности:

- а) убрав диафрагму 3, получить резкое изображение матового стекла 2 на экране 5. Заметить и зарисовать изображения квадратов;
- б) установить диафрагму 3 перед линзой, заметить и зарисовать вид изображения квадратов, нарисованных на матовом стекле;
- в) установить диафрагму 3 позади линзы и проделать то же, что и в предыдущем пункте.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Теоретическая часть.
3. Описание оборудования, хода работы.
4. Расчетные формулы.
5. Экспериментальные результаты.
6. Обработка экспериментальных данных, результаты расчета.
7. Выводы, заключение.

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Цель работы: 1. Определить и рассчитать оптические характеристики двух зрительных труб: угол поля зрения 2ω ; видимое увеличение Γ ; положение и размеры зрачков (D, D', t, t'); разрешающую способность ψ ; светосилу H .

2. Сравнить измеренные и расчетные характеристики и определить, к какому классу систем относятся указанные зрительные трубы.

Оборудование и принадлежности к работе

Оптическая скамья ОСК-2, осветители, исследуемые зрительные трубы, микроскоп-динаметр, угловая сетка, стеклянная шкала, штриховые миры, дополнительная зрительная труба.

Описание установки и порядок выполнения работы

1. **Описание установки.** В данной работе видимое увеличение зрительной трубы определяется по линейному увеличению в плоскости зрачков β_p (рис. 2.1).

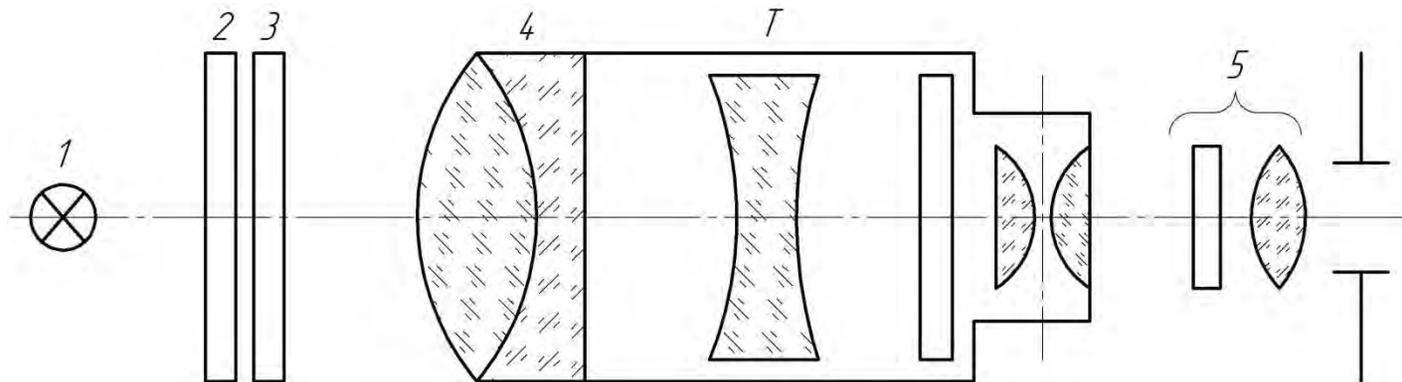


Рис. 2.1. Схема установки по определению видимого увеличения

Стекланную масштабную шкалу 3 размещают вблизи объектива 4 испытуемой зрительной трубы Т. Шкала 3 освещается лампой накаливания 1 через матовое стекло 2. Изображение этой шкалы получается недалеко от выходного зрачка ОС.

Для *определения видимого увеличения* измеряют величину этого изображения с помощью динаметра 5, представляющего собой микроскоп, в фокальной плоскости которого установлена сетка. При измерении к наружному торцу окуляра прижимают трубу динаметра 5, передвигая в нем трубку с лупой и сеткой, совмещают сетку динаметра с изображением шкалы 3. Измерив величину изображения, находят видимое увеличение трубы по формуле: $\Gamma = 1/\beta_p = (N_1 m_1)/(N_2 m_2)$, где N_1 – число целых делений стеклянной масштабной шкалы; m_1 – цена одного деления масштабной шкалы в мм; N_2 – число деления шкалы динаметра, укладываемых в N_1 делениях стеклянной шкалы; m_2 – цена одного деления шкалы динаметра ($m=0,1$ мм). Определение величины Γ следует произвести не менее 3-5 раз для различных значений изображений шкалы. Среднее арифметическое этих значений даст величину видимого увеличения зрительной трубы. Определить погрешность измерения.

Для *измерения диаметра выходного зрачка* D и его удаления от наружного края окуляра t' предварительно фиксируют лупу динаметра на резкое изображение его шкалы. Затем, осветив объектив зрительной трубы рассеянным светом и, прижимая тубус динаметра к наружному краю оправы окуляра, передвигают трубку внутри тубуса до тех пор, пока не будет резко виден в лупу выходной зрачок. Он имеет вид светлого полного круга или круга, срезанного с одной или двух сторон (если контролируемая система имеет призмы). Далее, по шкале динаметра измеряют D , а по шкале, нанесенной на трубке, отсчитывают расстояние от торца окуляра до ее выходного зрачка t' .

Затем определяется *диаметр входного зрачка* по формуле: $D = \Gamma D'$.

2. **Методика определения разрешающей способности.** Разрешающую способность исследуемой зрительной трубы определяют на оптической скамье (рис. 2.2).

В фокальной плоскости объектива коллиматора устанавливают штриховую миру. Проверяемую зрительную трубу 2 располагают между коллиматором 1 и дополнительной зрительной трубкой (на рис. 2.2 не показана), которая должна обеспечить необходимое увеличение при рассматривании изображения миры через контролируемую систему.

Окуляр дополнительной зрительной трубки устанавливают на резкое видение его сетки по глазу наблюдателя. Затем контролируемую телескопическую систему и вспомогательную трубку предварительно устанавливают на бесконечность. После этого зрительную трубку 2 размещают на скамье соосно с коллиматором. Окуляр контролируемой системы устанавливают так, чтобы через дополнительную трубку была резко видна сетка контролируемой системы. Наблюдая в окуляр дополнительной трубки, добиваются (перефокусировкой испытуемой

системы) резкого видения штрихов миры. По номеру разрешаемого элемента миры находят разрешающую способность проверяемой телескопической системы.

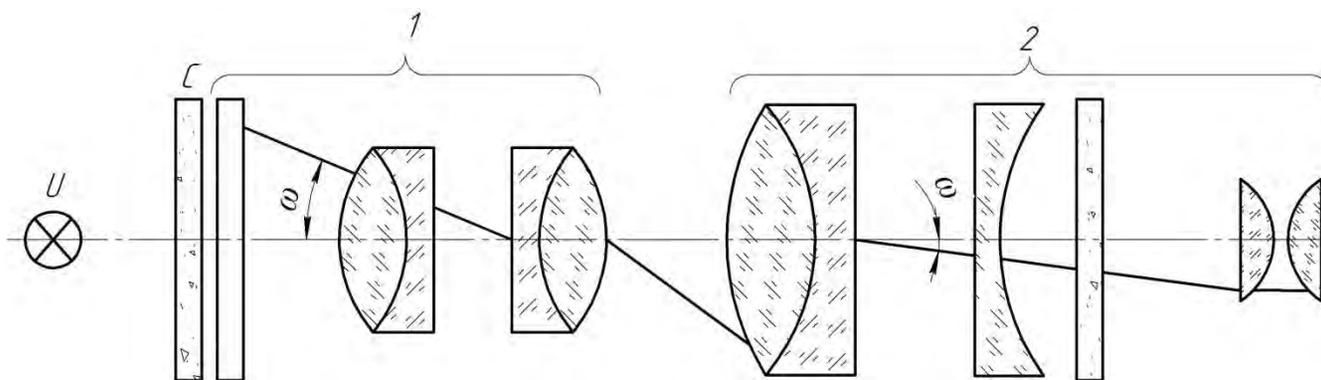


Рис. 2.2. Схема установки по определению разрешающей способности

3. *Расчёт светосилы зрительной трубы Н.*

Светосила зрительной трубы H рассчитывается по формуле: $H = gD^2 = g(D/\Gamma)^2$, где $g = \pi/4(n'/n)^2 \tau / f_2'^2$; n' и n – показатели преломления оптических сред, в которых расположены предмет и изображение; τ – коэффициент пропускания оптической системы; f_2' – фокусное расстояние глаза или объектива, с которым применяется телескопическая система.

Содержание отчета

1. Цель работы
2. Краткие теоретические сведения
3. Чертежи схем установок.
4. Результаты измерений и обработка экспериментальных данных.
5. Результаты расчётов, таблицы, графики.
6. Заключение (выводы).
7. Приложения.

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ФОТООБЪЕКТИВОВ

Цель работы: рассчитать и измерить визуальную разрешающую способность фотообъектива при различных значениях диаметра входного зрачка.

Оборудование и принадлежности к работе

Оптическая скамья ОСК-2, микроскоп, исследуемый фотообъектив, комплект мир, осветитель.

Описание установки и порядок выполнения работы

1. *Разрешающая способность оптической системы* – способность изображать отдельно два близко расположенных точечных предмета. Предел разрешения – минимальное расстояние, при котором два близко расположенных точечных предмета изображаются как отдельные. Критерий Рэля основан на том, что при провале в распределении интенсивности изображения двух близких точек в 20 % эти точки будут восприниматься как отдельные (рис. 3.1).

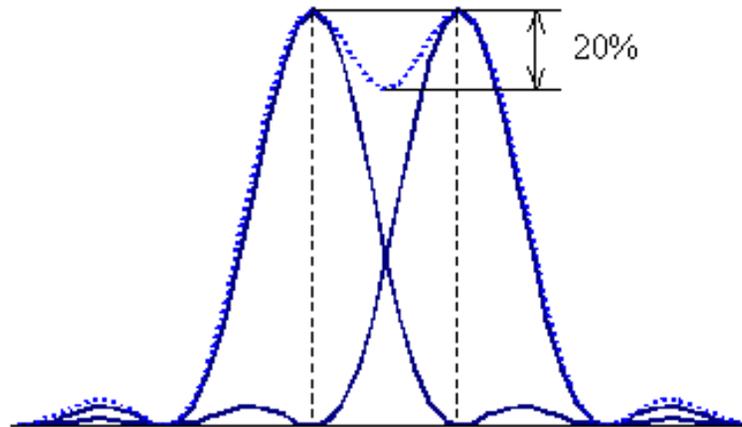


Рис. 3.1. Разрешение двух близких точек

Для фотообъективов изображения удаленных точек находятся в задней фокальной плоскости, где линейный предел разрешения равен:

$$\delta = \psi f'_{об},$$

где $f'_{об}$ - фокусное расстояние объектива.

На практике разрешающая способность фотографического объектива, как правило, определяется числом N штрихов для близкого изображения в количестве линий на единицу длины (лин/мм), когда эти штрихи находятся на пределе их разрешения.

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

или

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

В случае, если aberrации объектива достаточно велики, его разрешающая сила значительно уменьшается.

Разрешающая способность по Фуко применяется для оценки качества изображения в ОС, передающих объекты сложной структуры (в фотообъективах). Для ее определения используется *тест-объект* (мира Фуко), который состоит из черно-белых штрихов разной толщины (рис. 3.2). Поскольку разрешающая способность фотообъектива может зависеть от направления штрихов, в мире Фуко линии располагаются по четырем разным направлениям.

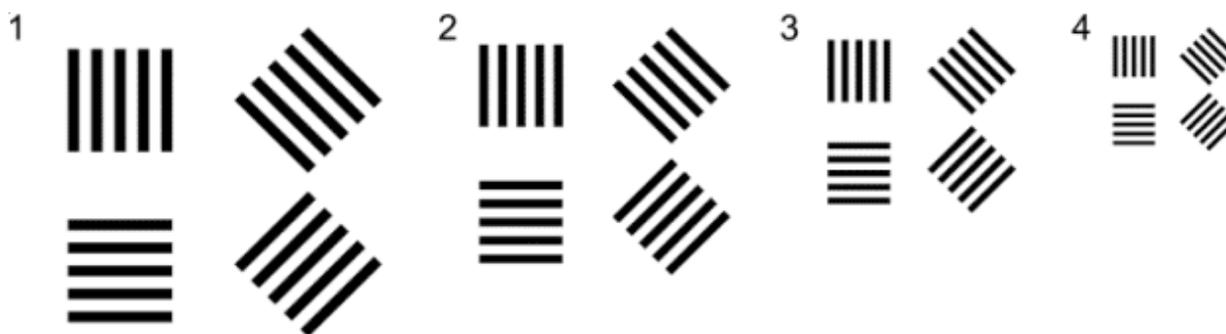


Рис. 3.2. Штриховые миры с номерами 1, 2, 3, 4

2. *Схема установки* для определения разрешающей силы объектива представлена на рис 3.3.

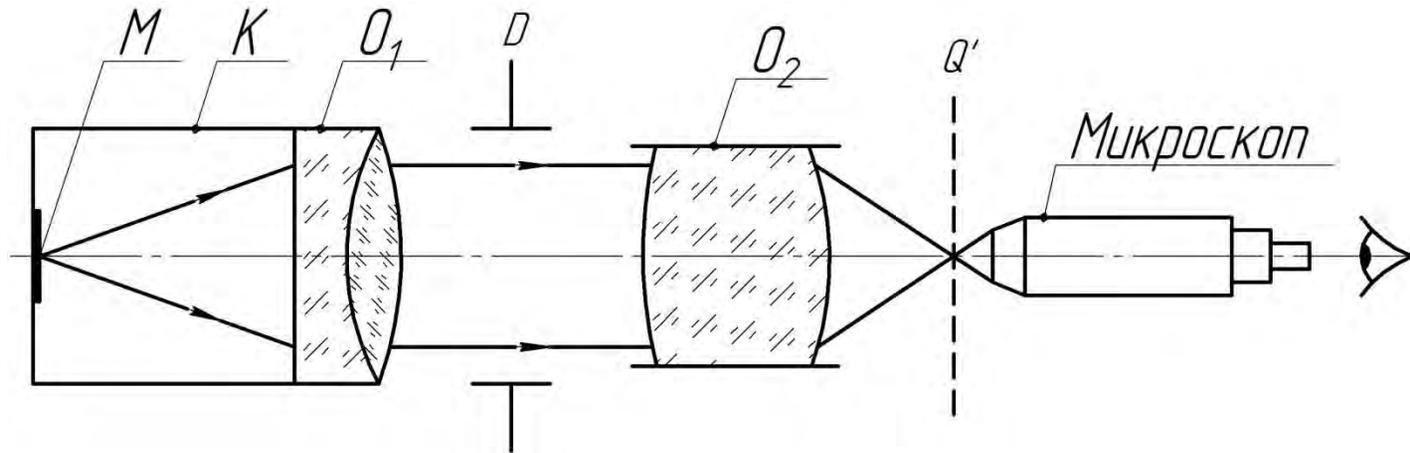


Рис. 3.3. Схема установки по определению разрешающей способности

В передней фокальной плоскости объектива O_1 коллиматора K помещается штриховая мира M . Изображение миры, даваемое объективом O_1 , в бесконечности. Очевидно, что угол, под которым видно это изображение, равен углу, под которым мира видна из передней главной точки объектива O_1 . Исследуемый объектив O_2 переносит это изображение миры, находящееся в бесконечности, в свою заднюю фокальную плоскость Q .

Угловое расстояние между изображением соседних штрихов миры равно $\alpha = \frac{l_m}{f'_k}$,

где l_m – линейное расстояние между соседними штрихами миры; f'_k – фокусное расстояние коллиматора ($f'_k = 1600$ мм.). Угловой размер $\bar{\psi}$ изображений штрихов миры в плоскости Q' равен также углу α .

Определение зависимости разрешающей способности фотообъектива от диаметра входного зрачка:

- изображение миры, даваемое исследуемым объективом, рассматривается в микроскоп;
- отмечается, какой квадрат миры находится на пределе разрешения при данном диаметре входного зрачка испытуемого объектива;
- диаметр входного зрачка испытуемого объектива определяется по шкале ирисовой диафрагмы, на которой указано значение диафрагменного числа $1/D$.

3. *Порядок выполнения работы:*

1. Для ряда значений диаметра входного зрачка D объектива определить соответствующие предельные разрешаемые группы штрихов.
2. Найти величины угловых ($\alpha = \bar{\psi}$) расстояний между штрихами миры.
3. Вычислить наименьшие разрешаемые расстояния ($\bar{\Delta}$) для соответствующих значений D :

$$\bar{\Delta} = \frac{\psi \cdot f'_{об}}{206 \cdot 10^3},$$

где $f'_{об}$ – фокусное расстояние испытуемого объектива; ψ – наименьший разрешаемый угол (сек.).

4. Вычислить величины разрешающей способности испытуемого объектива: $\bar{N} = \frac{1}{\bar{\Delta}}$ (мм⁻¹).
5. Вычислить величину N для соответствующих значений D .

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Оборудование.
3. Краткие теоретические сведения, расчетные формулы.
4. Чертеж схемы установки.
5. Результаты измерений эксперимента.
6. Результаты расчета линейной и угловой разрешающей способности (таблицы).
7. Графики зависимостей разрешающей способности от диаметра входного зрачка $N(D)$ и $\bar{N}(D)$.
8. Заключение: сравнительный анализ N объектива для различных значений D .

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛАЗА КАК ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Часть 1. Исследование недостатков зрения

Цель работы. Изучить строение глаза и недостатки зрения; измерить рефракцию очковых линз и рассчитать по ним аметропию глаза.

Оборудование и принадлежности к работе

Диоптриметры ДО-2, ДО-3, очковые стекла.

Описание установки и порядок выполнения работы

1. **Оптическая схема прибора.** На рис.4.1 изображение коллиматора через объектив рассматривается с помощью зрительной трубы. Резкое изображение сетки коллиматора на сетке зрительной трубы получается, когда на входе параллельный пучок лучей. Изменяя сходимости или расходимости пучка света, падающего на очковую линзу, можно добиться параллельности пучка лучей на выходе (перемещая сетку коллиматора добиваемся ее резкого изображения в поле зрения зрительной трубы). Каждому положению сетки коллиматора соответствует определенное значение задней вершинной рефракции введенной очковой линзы, значения которой в диоптриях наносятся на шкалу, перемещаемую вместе с сеткой коллиматора, и отсчитываются по этой шкале.

Лучи света от лампы 1 освещают сетку 4; при отсутствии очковой линзы из объектива 6 выходит параллельный пучок лучей, а сетка находится в его задней фокальной плоскости. При этом против отсчетного индекса должно находиться нулевое деление шкалы рефракций. Пройдя через плоскопараллельную стеклянную пластинку 7 с агатовым стержнем, пучок лучей попадает в объектив 12, а затем в его в фокальную плоскость, в которой помещены две пластинки 15, на одной из которых нанесено перекрестие, а на другой – круговая шкала. Изображение сетки коллиматора, перекрестие и круговая шкала, рассматриваются через окуляр 17. Наводя по глазу окуляр на резкость изображения, можно увидеть картину, изображенную на рис. 4.2. После того, как в ход лучей помещена очковая линза 9, изображение сетки коллиматора в фокальной плоскости объектива зрительной трубы может быть получено только при смещении сетки коллиматора 4.

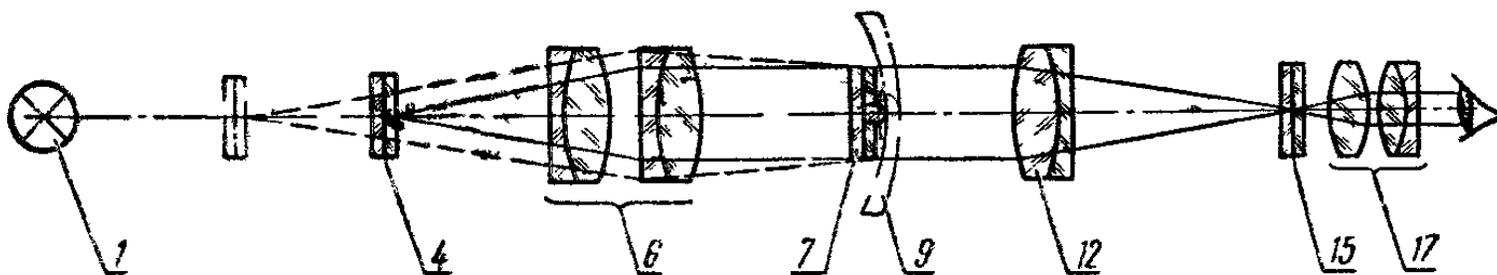


Рис. 4.1. Схема лучей в диоптриметре

Если рефракция очковой линзы отрицательна, сетка должна быть выведена из фокальной плоскости в направлении от объектива, если же рефракция очковой линзы положительна – к объективу.

2. Порядок работы.

Измерение задней вершинной рефракции очковых линз.

Отдельную очковую линзу необходимо положить на подвижную гильзу той поверхностью, которая должна быть обращена к глазу. Опустив рычаг, прижать линзу к вершине агатового стержня 7.

Наблюдая в окуляр и перемещая сетку коллиматора, получить в поле зрения наилучшую одинаковую резкость изображения точек сетки коллиматора. Появление вторичных изображений точечной сетки не влияет на точность измерения. Изображение точечной сетки легко привести к центру перекрестия, перемещая измеряемую линзу в соответствующую сторону.

Переводя взгляд на изображение шкалы рефракций, отсчитать значение вершинной рефракции измеряемой линзы в диоптриях. Цена деления шкалы рефракций равна 0,25 дптр., но нониус делит её ещё на 5 частей с ценой деления каждой части 0,05 дптр. При необходимости получения более точного результата следует, повторяя установку, снять 10 отсчетов и взять из них среднее арифметическое.

В зависимости от вида очковой линзы (стигматическая, астигматическая с призматическим действием, бифокальная) приёмы измерения будут несколько различны.

Измерение задней вершинной рефракции стигматических очковых линз.

Установить очковую линзу на диоптриметре. Перемещая её по агатовому стержню, привести изображение центральной точки точечной сетки на перекрестие сетки зрительной трубы (рис. 4.2). С помощью маховичков получить в поле зрения наиболее резкое изображение точечной сетки. Оптический центр линзы отмечается средним штоком отметочного приспособления.

По изображению шкалы рефракций с нониусом можно найти значение вершинной рефракции измеряемой линзы в диоптриях (рис. 4.3).

Измерение астигматических очковых линз. Особенностью астигматической очковой линзы является наличие в ней двух главных сечений, в каждом из которых задняя вершинная рефракция имеет свое значение. При помощи диоптриметра можно определить значение этих рефракций, а также установить направление обоих главных сечений.

При измерении астигматической очковой линзы в поле зрения зрительной трубы вместо окружности из светлых точек виден ряд полос, расположенных параллельно одному из двух главных сечений очковой линзы. При установке на рефракцию второго главного сечения ряд параллельных полос будет направлен перпендикулярно направлению ряда полос в первом главном сечении. Чем больше астигматическая разность данной линзы, тем более вытянутыми будут полосы.

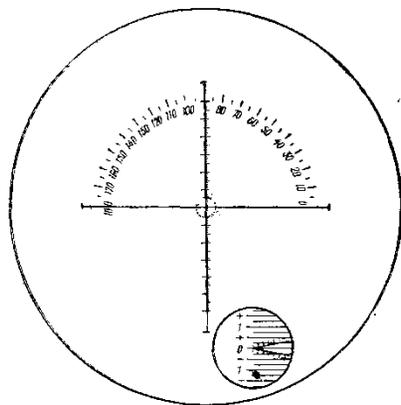


Рис. 4.2. Поле зрения окуляра зрительной трубы

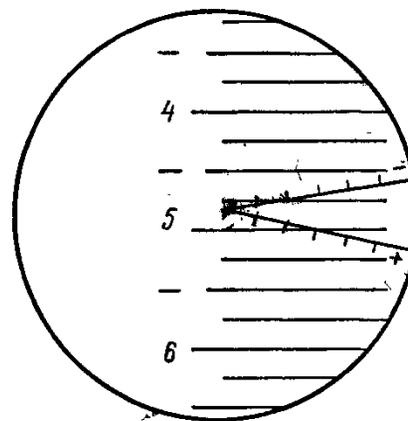


Рис. 4.3. Числовой отсчёт с нониусом

Измерение бифокальных очковых линз. Бифокальная очковая линза представляет собой комбинацию двух разных очковых линз. В данном случае необходимо определить отдельно характеристики обеих частей очковой линзы и измерить расстояние между их оптическими центрами.

Содержание отчёта.

1. Краткое описание цели работы и оптические схемы прибора.
2. Результаты измерений рефракции и вычисленной погрешности измерений.

3. Результаты расчёта аметропии глаза, для которого предназначены исследуемые очковые линзы.
4. Заключение, выводы.

Часть 2. Исследование глазного дна

Цель работы. Исследовать глазное дно в прямом виде. Определить аметропию «врача и пациента». Исследовать сетчатку глаза с помощью сине-зеленого светофильтра СЗС. Исследовать сосудистое дерево через оранжевый светофильтр.

Оборудование и принадлежности к работе

Офтальмоскоп ЭО-6.

Описание установки и порядок выполнения работы

1. **Описание прибора.** Прибор предназначен для безрефлексного исследования глазного дна в прямом и обратном видах при освещении белым светом и так называемом «бескрасном» свете, определения глазного яблока, а также для исследования переднего отдела глаза при щелевом освещении. Его состав:

1. Насадка офтальмоскопическая (рис. 4.4.).
2. Осветитель (волоконный жгут с двумя наконечниками)
3. Блок БМО.

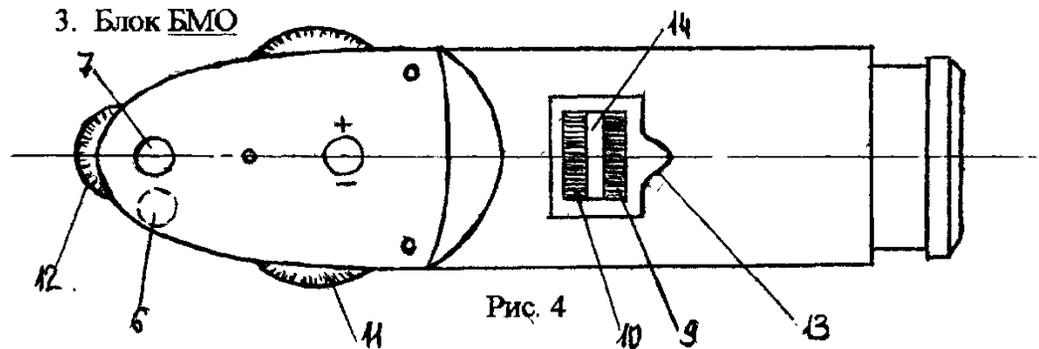


Рис. 4.4. Блок БМО

4. *Порядок работы*

Для компенсации аметропии «врача» и «пациента» включить линзы 11 и 12 одновременно. Рефракции включенных линз суммируются. Первоначально диски 11 и 12 установить таким образом, чтобы в окнах 6 и 7 появились цифры «О». Затем диск 9 повернуть так, чтобы в ход лучей была введена диафрагма 4, тогда в окне 13 появится цифра «4». Если светофильтры диска 10 выведены из хода лучей, в окне 14 увидим «1».

Указательный палец руки «Врача» должен лежать на диске 11 офтальмоскопа.

Поворотом диска 11 установить линзу, корригирующую аметропию глаза «врача». Для этого врач смотрит через окно 7 на текст и, вращая диск 11, добивается наиболее резкого изображения.

Приставив прибор к глазу, «врач» приближается к пациенту до тех пор, пока не увидит изображения глазного дна, либо красного пятна, являющегося размытым изображением сетчатки. При нерезком изображении глазного дна пациента «врач» поворачивает диск 11 до тех пор, пока не увидит наиболее резкое изображение деталей глазного дна, при высоких степенях аметропии исследуемого глаза включить одну из линз диска 12. Следует отметить, что подбор линз удобнее всего проводить, не отрывая взора от изображения глазного дна.

При осмотре глазного дна, если величина поля зрения недостаточна для полного исследования, прибор следует поворачивать вокруг вертикальной оси и тем самым получить изображение различных зон глазного дна. Для исследования сетчатки поворотом диска 10 ввести в ход лучей сине-зеленый светофильтр, в остальном то же, что и без фильтра;

Для исследования сосудистого дерева поворотом диска 10 в ход лучей ввести оранжевый светофильтр.

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЕКЦИОННЫХ СИСТЕМ

Цель работы. Изучение принципа действия оптической системы эпидиаскопа; определение основных оптических характеристик объективов эпи- и диа-каналов; описание оптической схемы проекционного прибора и назначения оптических деталей, входящих в схему.

Оборудование и принадлежности к работе

Эпидиаскоп ЭПД 455, образцы, экран, каталоги объективов, измерительные линейки.

Порядок работы и описание установки

1. Исследование проекционной системы эпи-канала:

- а) определить оптические характеристики проекционного объектива (f' , S_F , S_F');
- б) определить проекционное расстояние p' ;
- в) определить линейное увеличение эпиканала ($\beta_{об}$);
- г) определить угловое поле проекционного объектива.

2. Исследование проекционной части диаканала:

- а) исследовать и зарисовать оптическую схему осветительной части диаканала;
- б) определить линейное увеличение проекционной части, используя прозрачный объект;
- в) определить оптические характеристики объектива (f' , S_F , S_F');
- г) определить линейное и угловое поле объектива;

3. Составить оптическую схему проекционной установки эпи- и диа-каналов, определить назначение каждой оптической детали, входящей в схему.

Отчет должен содержать:

- а) краткое описание цели работы и оптической схемы эпи- и диаканалов;
- б) результаты всех указанных в работе исследований, измерений и расчетов;
- в) оптические характеристики проекционных объективов.

Лабораторная работа №6

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРОПУСКАНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ ОБРАЗЦОВ НА ФОТОМЕТРЕ

Цель работы. Получение практических навыков работы на фотометре, измерение коэффициентов пропускания и поглощения оптических образцов абсолютным и относительным методом.

Оборудование и принадлежности к работе

Фотометр ФМШ-56М, КЮ-приспособления, набор светофильтров, образцов.

Порядок работы и описание установки

1. **Устройство и принцип работы.** Шаровой фотоэлектрический фотометр типа ФМШ-56М предназначен для измерения коэффициентов отражения твердых светорассеивающих объектов, сыпучих материалов и коэффициентов пропускания прозрачных, нерассеивающих свет образцов. Прибор представляет собой двухлучевой фотоэлектрический фотометр с двумя фотоэлементами, один из которых является измерительным, второй – компенсационным. В измерительном плече фотометра помещен светомерный шар.

Свет лампы 1, пройдя конденсор 2, поглотитель 3 и светоделительную пластинку 4, поступает далее через объективы 6 и 8 и зеркало 9 в шар 12. Свет, рассеянный в шаре, поступает через окно 13, закрытое молочным стеклом, на фотоэлемент 14, расположенный за шаром. Защитное стекло 11 предохраняет шар от запыления. В нижней части шара имеется отверстие для измеряемых образцов и эталона.

Наклоном зеркала 9 световой пучок, поступающий в шар, можно наводить на образец 16, или стенку шара. Наклоны зеркала 9 осуществляются рукояткой. Образцы размещаются на столике 17 (рис. 6.1). Над шаром перед защитным стеклом смонтирован столик 25 под образцы 10 при измерении коэффициента светопропускания. Изменение светового потока осуществляется измерительной диафрагмой 7 переменного раскрытия. Измерительная диафрагма имеет шкалу светопропускания от 100 до 0,1%.

Экран 15 предохраняет фотоэлемент от попадания на него отраженных непосредственно от образца лучей.

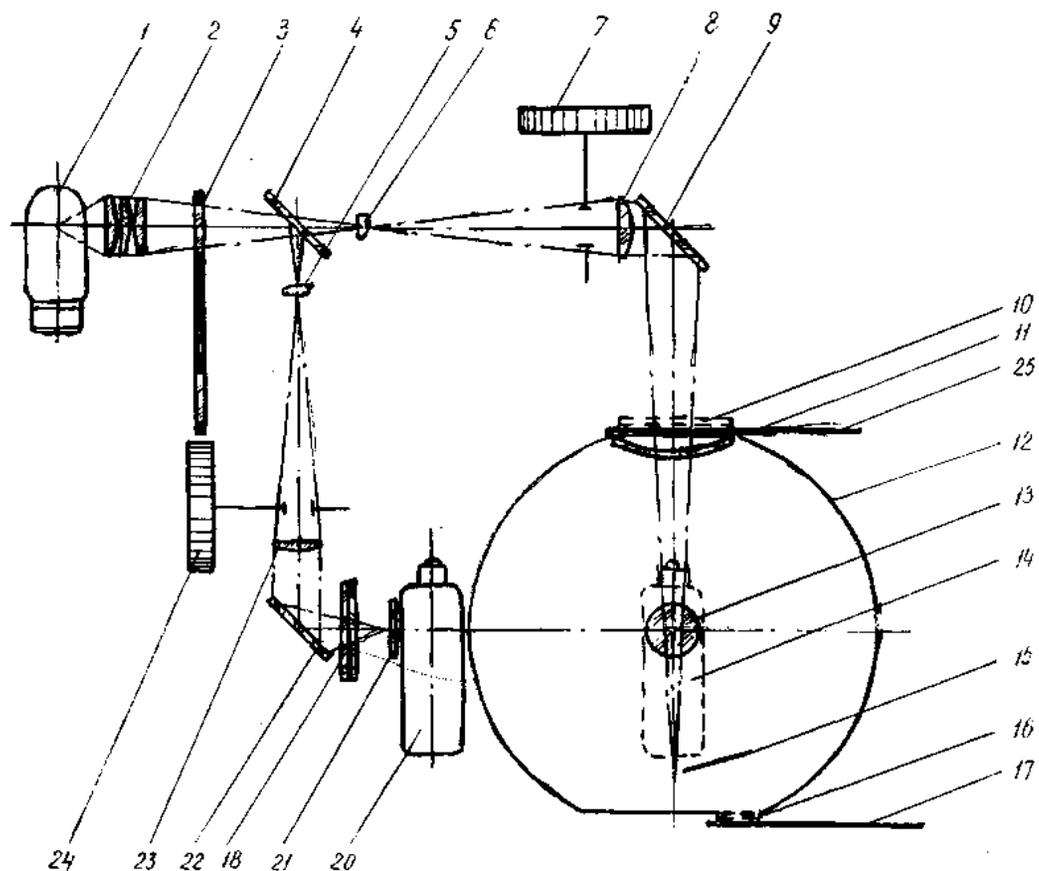


Рис.6.1. Схема фотометра

Второе плечо фотометра служит для компенсации фототока, возникающего в измерительном плече.

Свет, отразившейся от светоделительной пластинки 4, пройдя через линзы 5, 23, зеркало 22 и нейтральный клин 18, попадает на компенсационный фотоэлемент 20. Перед фотоэлементом, для более равномерного освещения катода, помещена пластинка 21 из молочного стекла МС. В этом плече установлена диафрагма 24, с помощью которой можно изменять поступающий на фотоэлемент световой поток.

Оптическая схема рассчитана так, что компенсационная 24 и измерительная 7 диафрагмы расположены в плоскостях, где линзами 5 и 6 создается изображение светового диаметра конденсора 2, т.е. это будут плоскости равномерного освещения и величина прошедшего через диафрагмы светового потока будет пропорциональна

площади их раскрытия. В основу измерения коэффициента отражения положен метод Тейлора: пучок света направляется на испытуемый образец, помещенный в шаре; световой поток, отраженный образцом и претерпевший многократное отражение от внутренней поверхности шара, создает на фотоэлементе освещенность пропорциональную коэффициенту отражения образца.

В приемном отверстии в стенке шара молочное стекло. Между образцом и приемным окном устанавливается экран, чтобы свет, отраженный от образца, не попадал на фотоэлемент. Далее световой поток направляется на стенку шара, установленный экран убирается, а выходной измерительный прибор фиксирует отсчет, соответствующий полной освещенности в шаре. Отношение первого измерения ко второму дает общий коэффициент отражения образца.

В случае измерения общего коэффициента пропускания определяется освещенность в двух случаях:

- а) пучок света проходит через испытуемый образец, устанавливаемый перед шаром;
- б) свет попадает на стенку шара; отношение первого измерения ко второму дает общий коэффициент пропускания образца.

2. *Порядок выполнения работы*

1. После прогрева прибора (не менее 30 мин.) проверить «электрический нуль». Провести юстировку прибора с помощью контрольного зеркала путем наблюдения за изображением нити накаливания лампы через верхнее отверстие в светомерном шаре.

2. На верхний столик поместить вкладыш 2, измеряемый образец (нейтральный светофильтр НС), закрепить их зажимом. Установить столик в рабочее положение. На нижний столик положить баритовую пластинку.

3. Установить зеркало 9 в положение «ПР» (пропускание). Ввести экран между образцом и окном фотоэлемента. Измерительную диафрагму (ИД) установить на полное раскрытие (100%).

4. Изменением раскрытия компенсационной диафрагмы (КД) и перемещением нейтрального клина приводят стрелку гальванометра к нулевому делению. Снять измеряемый образец.

5. Наружное равновесие электрической схемы восстановить уменьшением раскрытия измерительной диафрагмы. Отсчет по шкале ИД дает непосредственно коэффициент пропускания образца. Повторить операции 3-9 не менее 5 раз. Свести результаты в таблицу.

6. Вычислить значение коэффициента пропускания; толщина образцов светофильтров дана в таблице.

7. Установить ИД и КД на полное раскрытие (100%). Без образца на верхнем столике с помощью нейтрального клина стрелку гальванометра привести в нулевое положение. Установить измеряемый образец. Нарушение электрического нуля восстановить уменьшением раскрытия КД. Отсчет по шкале КД будет $\tau_{изм}$ образца. Сравнить вычисленный $\tau_{расч}$ с измеренным $\tau_{изм}$.

8. Поместить непрозрачный объект на нижний столик. Верхний столик с вкладышем 2 должен находиться в рабочем положении. ИД установить на полное раскрытие (100%). Зеркало 9 устанавливается рукояткой в положение «0» (отражение). Между образцом и окном фотоэлемента установить экран.

9. С помощью КД и нейтрального клина стрелка гальванометра приводится в нулевое положение

10. Нарушение равновесия электрической схемы восстановить закрытием ИД. Отсчет по шкале даст величину коэффициента отражения образца. Результаты измерения коэффициента отражения ρ свести в таблицу, вычислить среднее значение коэффициента отражения ρ . Вычислить погрешности отсчетов.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Оборудование.
3. Основные сведения из теории.
4. Оптическая схема прибора, назначение.
5. Методика и ход работы.
6. Таблицы измерений. Характеристики и описание измеряемых образцов.
7. Обработка результатов измерений с оценкой точности.
8. Таблица расчетов.
9. Заключение.

Характеристики светофильтров

Таблица.

Наименование светофильтра	НС-1	НС-2	НС-3	НС-6	НС-7	НС-8	НС-9	НС-10	НС-11	НС-12	НС-13
Толщина светофильтра d , мм.	3,0	3,2	3,0	2,8	3,4	2,8	3,2	2,8	3,2	3,1	3,1

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ И СВОЙСТВ ТИПОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Цель работы. Исследование конструктивных элементов линзы и призмы; приобретение навыков по работе со справочниками, государственными и отраслевыми стандартами.

Оборудование и принадлежности к работе

Исследуемые детали, штангенциркули, измерители, весы, справочники и стандарты.

Часть 1. Исследование конструкций линз

Типы линз

1. По характеру преобразования пучка лучей: положительные (толщина по краю t меньше толщин по оси d); отрицательные ($t > d$);
2. По форме преломляющих поверхностей: сферические, асферические, цилиндрические, торические;
3. По форме боковой поверхности: круглые и некруглые.

Конструкции линз

При конструировании линз определяют конструктивные элементы (рабочие и базовые поверхности; фаски), связанные с юстировкой и креплением линзы. После абберационного расчета конструктору известны: световые диаметры линз, толщина линз по оси, радиусы кривизны поверхностей линзы, материал линзы.

Толщина линзы d должна обеспечивать достаточную жесткость, не допускающую деформации линз, как при изготовлении, так и после крепления к оправе. Материалом для линз служит чаще всего, оптическое бесцветное стекло различных марок, для малоответственных линз применяют органическое стекло.

Линзы, работающие в УФ и ИК областях спектра, изготавливаются из кварцевого стекла, оптической керамики и из кристаллов (флюорит, фтористый литий, лейкосапфир), а также германия и кремния.

Оформление чертежей линз необходимо производить по рекомендациям [1].

Допуски и требования при конструировании линз

На рабочих чертежах линз указываются две группы допусков:

- требования к материалу;
- требования к изготовлению.

Допуски на характеристики бесцветного стекла по ГОСТ 3514 – 94 для линз различного назначения приведены в таблице 7.1. При выборе допусков следует учитывать:

- данные таблицы 12 [2];
- возможности стекловаренных заводов по пузырности (табл. 13–16) [2].

Точность изготовления рабочих поверхностей регламентируется допусками N , ΔN и ΔR .

В таблице 7.2 приложения приведены среднеопытные нормы этих допусков для линз различного назначения. Там же приведены величины допусков на децентрировку линз и допуски на толщину линзы по оси.

Необходимо, чтобы допуски Δd соответствовали нормальному ряду \pm мм:

0,01; 0,02; 0,03; 0,05; 0,07; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 0,7; 1,0.

Допуск на диаметр линзы назначается в зависимости от требований к точности центрирования оптической системы. Рекомендации по выбору этих допусков приведены в [3].

Классы шероховатости указаны в ГОСТ 2.309-81 и выбираются:

для рабочих поверхностей линзы – R_z 0,05 (полировка);

для базовых поверхностей – 2,5.

Классы чистоты рабочих поверхностей регламентируются в [4].

Покрyтия линз

Рабочие поверхности линз часто подвергают просветлению, защите; иногда на них наносят зеркальные покрытия.

Боковые (базовые) поверхности покрываются черной эмалевой краской. Рекомендуют к применению эмаль ХС-75УГМ по ТУ 6-10-2136-88 черного цвета.

На практике применяют следующие виды просветления (целью его является уменьшение потерь света при отражении): травление кислотами (Т); испарением в вакууме (И); катодным распылением (К); методом полива (Р). Наиболее часто в настоящее время применяют однослойные просветления – 24И; 43Р; двухслойное – 44Р 43Р; многослойное – 43Р 44Р43 Р. Последнее используют в спектральных приборах из-за малой избирательности по коэффициенту отражения.

Сведения о покрытиях приведены в [5]; [6].

Часть 2. Отражательные призмы

Назначение призм

- для измерения направления светового пучка и оборачивания изображения (наблюдательные и измерительные ОП),
- для соединения или разделения световых пучков, для разделения полей зрения,
- диспергирование, поляризация,
- уменьшение габаритов оптических приборов,
- специальное (например, компенсация вращения изображения).

Преимущества призм перед зеркалами

- призма, имеющая несколько отражающих граней, представляет собой жесткую систему, в то время как система зеркал вследствие отдельного крепления подвержена расстройству при работе и требует тщательной юстировки при сборке;
- крепление призмы в оправе проще и габариты оправ получаются меньшими, в призмах часто используется эффект полного внутреннего отражения, при котором отсутствуют потери света, в то время как у зеркал потери света при отражении всегда значительны (от 5% при серебрении до 45% при хромировании);
- отражающие грани призм, имеющие зеркальные покрытия, легко защитимы от внешних воздействий и более устойчивы, чем внешние покрытия зеркал;
- некоторые отражательные призмы невозможно заменить зеркалами (призму Дове, Шмидта и др.) без увеличения габаритов системы.

Замена призм зеркалами целесообразна в тех случаях, когда имеет значение вес оптического прибора.

Основные свойства отражательных призм:

- эквивалентность действию плоскопараллельной пластинки; обратимость;
- возможность полного внутреннего отражения;
- возможность работы в наклонных пучках при нормальном падении луча.

Размеры конструкций призм. Размеры отражательных призм зависят от размеров поперечного сечения пучка и определяются при расчете оптических систем. Расчетные формулы для определения основных размеров (длин граней, величин углов и длин хорд осевого луча) для типовых призм даны в справочнике [7].

Расчетные размеры призм обычно увеличивают на 0,5 – 2мм для обеспечения юстировки и крепления призм в оправках. Указанный припуск берется меньше, когда призма закреплена в гнезде и больше при креплении в отдельной оправе.

Фаски на призмах от выколок нормализованы [8]. Они снимаются по нормали к биссектрисе угла между гранями, ширина фасок измеряется по наибольшей стороне прямоугольника. На ребре призм снимается фаска шириной 0,02 – 0,05мм (она является источником потерь света).

Покрyтия призм. Рекомендуется просветлять преломляющие грани призм (часто используется просветление 24 И 300⁰ по ОСТ 3-1901-85).

Зеркальные покрытия отражающих граней призм предохраняются от разрушения с помощью нанесения на них тонкого слоя меди электролитическим методом и затем еще слой лака.

Пример обозначения: зеркальн. 8И.3И.72П по ОСТ 3-1901-85, $\lambda=500 \pm 20$ нм.

Матовые поверхности покрываются эмалью черного цвета (см. п. 1.4.).

Допуски на изготовление призм

Рекомендации по выбору допусков к материалу призм изложены в табл. 7.1.

Погрешности углов между отражающими и преломляющими гранями и пирамидальность π приводят к клиновидной развертке, а π еще вызывает ошибку визирования. Величина допусков на указанные углы и пирамидальность вычисляются в зависимости от допустимых величин хроматизма и требований к точности всего прибора [7, 9, 10]. Погрешности углов между преломляющими гранями неподвижных призм вызывают только изменение угла отклонения пучка, которое может быть скомпенсировано юстировкой оптической системы (допуски на эти углы порядка 3' – 5'). Погрешности углов крыши вызывают двоение изображения, поэтому допуски на эти углы всегда назначаются жесткими (3" – 4").

Требования по N и ΔN к отражающим граням всегда в 4-6 раз выше, чем к преломляющим.

Рекомендуемые допуски на форму поверхностей призм, полученные на основании статистических данных, приведены в таблице 7.2. Классы чистоты оптических поверхностей выбираются по рекомендациям, изложенным в части 1.

Более жесткий допуск указывается для поверхностей призм, работающих перед объективом при увеличениях $\Gamma > 6^X$; средний допуск для призм, работающих перед объективом, но для $\Gamma < 6^X$, и для поверхностей призм, расположенных после объектива. Менее жесткий допуск берется для поверхностей призм, расположенных вблизи плоскостей изображения.

Порядок работы

1. Линзы

1. Определить типы линз.
2. Ознакомиться с рекомендациями стандартов.
3. Определить конструктивные размеры путем обмера линз и использованием стандартов [3, 5, 8, 11].
4. Определить расчетные размеры линз; радиусы, рассчитанные по стрелке прогиба линз, привести в соответствие со стандартом [12].
5. Считая линзы центрирующими, определить поле допуска, исходя из назначения линз см.[3].
6. Назначить тип просветляющего покрытия и выбрать матовую черную эмаль.
7. Назначить допуски к материалу и изготовлению линзы. При назначении категории пузырности учитывать вес заготовки $P_3=(1,5\div 2) * P$ детали. Необходимо рассчитать вес линзы.
8. Рассчитать допуски; сравнить с рекомендуемыми по таблицам и проанализировать значения.
9. Рассчитать \hat{f} , S_F , S'_F , на заднее вершинное расстояние задать допуск $\pm 1\%$ от \hat{f} .
10. Выполнить эскизы линз с заполнением таблиц.

2. Призмы

1. Определить тип призм, их обозначение.
2. Ознакомиться с рекомендациями стандартов.
3. Определить конструктивные размеры призм путем обмера и использованием стандартов [8]. Измеренные величины округляются до нормальных [11].
4. Назначить тип просветления и установить тип матовой эмали.
5. Назначить допуски к материалу и изготовлению призмы.
6. Рассчитать допуски и проанализировать их значения.
7. Выполнить эскизы призм.

3. Содержание отчета

Линзы

1. Краткое описание цели работы.
2. Описание типа заданных линз, основных параметров линз (табл.7.3).
3. Порядок определения конструктивных и расчетных параметров линз.
4. Обоснование выбора допусков к материалу и изготовлению линз и типа покрытий.
5. Результаты обмера линз и расчета допусков.

6. Перечень используемых при расчете формул.
7. Чертежи двух линз.

Призмы

1. Краткое описание цели работы.
2. Описание типа заданных призм и основных параметров (табл.7.4).
3. Результаты обмера призм и расчета допусков.
4. Обоснование выбора допусков к материалу и изготовлению призм, выбора типа покрытий.
5. Расчетные формулы.
6. Эскизы двух призм.

Литература

1. ГОСТ 2.412-81 Правила выполнения чертежей и схем оптических изделий.
2. ГОСТ 3514-94 Стекло оптическое бесцветное.
3. ОСТ 3-2124-74 Соединение круглых оптических деталей с оправками.
4. ГОСТ 11141-84 Классы чистоты поверхностей оптических деталей.
5. ОСТ 3-490-83 Линзы оптические.
6. ОСТ 3-1901-85 Покрытия оптических деталей.
7. В.Л. Панов и др. Справочник конструктора оптико-механических приборов, 1980, «Машиностроение»
8. ОСТ 3-1825-73 Детали оптические. Фаски.
9. В.С. Плотников и др. Расчет и конструирование оптико-механических приборов, 1972, М., «Машиностроение».
10. М.Д. Мальцев Расчет допусков на оптические детали, 1974, М., «Машиностроение».
11. ГОСТ 6636-69 Нормальные линейные размеры.
12. ГОСТ 1807-75 Радиусы оптических поверхностей.
13. Г.В. Погарев Юстировка оптических приборов. 1968, Л., «Машиностроение».
14. ГОСТ 2786-82 Стекла пробные для проверки радиусов сферических поверхностей ОД.
15. ГОСТ 14887-80 Клеи оптические.
16. ОСТ 3-2989-85 Детали оптические склеенные.
17. ОСТ 3-2500-74 Детали оптические. Просветление травлением.
18. ГОСТ 3-2500-74 Детали оптические. Просветление травлением.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 7.1. Допуски на характеристики стекла (ГОСТ 3514-94) для линз и призм

Наименование	Категории и классы стекла (допуски)						
	Δn_e	$\Delta(n_F - n_C)$	Оптическая однород.	Двойное лучепр.	Показатель ослабления	Бесвиль- ность	Пузырность
Объективы и оборачивающие линзы телескопических систем	3В	3В	2 – 3	2 – 3	2-3	1Б	5Д, 6Е
Высококачественные объективы коллиматоров, дальномеров, астрономических приборов	2Б	2В	1–2	1–2	4–5	1Б	5Д, 6Е
Фотообъективы:							
-аэрофотосъемка	2Б	2В	2–3	2	5–6	1Б	4Г, 5Д
- репродукционные	2Б-3В	2Б–3В	2–3	1–2	5–6	1Б	4Г, 5Д
- обычные	3В	3В	3	2–3	6	1Б	5Д, 6Е
Микрообъективы							
- до $10^{\times} \times 0,25$	3В	3В	2–3	2–3	7	2Б	3Г, 4Д
- от $10^{\times} \times 0,25$ до	2Б	2В	1–2	1-2	6	1Б	2Г
- $40^{\times} \times 0,65$ и выше	2Б	2В	1–2	1–2	5	1Б	1Б, 2Г
Линзы окуляров	4Г	4Г	2 – 4	2–3	6-7	2Б	2Г
Призмы:							
-рефрактометрические,	4Г	3Б	1	1	3–5	1А	3Г–4Д
спектральные	5Г	5Г	1–3	2	3-4	1А,2А	2Б–5Д
- отражательные							

Таблица 7.2. Допуски на расчетные размеры линз и призм

Назначение линз и призм	N	ΔN	Класс пробного стекла ΔR	Допуск на толщину \pm мм	Допуск на центрировку \pm мм
Объективы телескопических систем	2 - 3	0,2–0,5	2 – 3	0,1 – 0,3	0,01 - 0,05
Оборачивающие линзы	3 - 5	0,3–0,5	2	0,2 – 0,3	0,02 – 0,1
Коллективы	10-15	0,5–1,0	3	0,2 – 0,5	0,05 – 0,2
Высококачественные объективы коллиматоров и др. приборов	0,5	0,05	1 - 2	0,05 – 0,1	0,02 – 0,05
Фотообъективы					
- аэрофотосъемочные	1 – 2	0,1–0,2	1–2	0,01–0,03	0,005–0,2
- обычные	2 - 3	0,2–0,5	2-3	0,05–0,3	0,005–0,2
Микрообъективы					
- до $10^{\times} \times 0,25$	2–3	0,2–0,5	2–3	0,01–0,05	0,003-0,005
- от $10^{\times} \times 0,25$ до $40^{\times} \times 0,65$	1–2	0,1–0,2	1–2	0,01–0,05	0,003-0,005
- от $40^{\times} \times 0,65$ и выше	0,5-1,0	0,05–0,1	1	0,01–0,05	0,003-0,005
Окуляры					
- микроскопов	3 – 5	0,5–0,8	3	0,1	0,01 – 0,05
- телескопических систем	3 - 5	0,3–0,5	3	0,1–0,3	0,01 – 0,1
Призмы:					
- отражающие грани	0,5-1,0	0,1–0,3	3		
- преломляющие	2-4	0,5–1,0	3		

Таблица 7.3

№	Назначение линзы	Размещение в приборе	Материал линзы	Характеристики прибора	Условия работы прибора
1	Линза анаморфотная	Внутри прибора	СТК 3	-	Работа в помещениях
2	Линза аэрофотообъектива	Одна поверхность наружная	ТК 16	$f^{\wedge} = 250\text{мм},$ $1:2, 2\omega = 40^{\circ}$	Динамический режим с перепадом t°
3	Линза конденсора	Внутри прибора	К8	$f^{\wedge} = 30\text{мм}$ $A = 0,6 \quad V = 4^{\text{X}}$	Лабораторный режим t° до $+50^{\circ}$ с.
4	Линза – коллектор	Наружная линза	К19	$f^{\wedge} = 20\text{мм}$ $A = 0,3$	Нормальный режим, $t^{\circ} + 20^{\circ}$ с.
5	Линза микрообъектива	Внутри прибора	К14	$f^{\wedge} = 20\text{мм}$ $A = 0,14$	Нормальный режим $t^{\circ} + 20^{\circ}$ с.
6	Линза–отражатель	Наружная линза	ЛК7	-	Повышенный тепловой режим
7	Линза проекционного объектива	Внутри прибора	ТК2	$f^{\wedge} = 40\text{мм}$ $V = 6^{\text{X}}$ $A = 0,2$	Нормальный режим $t^{\circ} + 20^{\circ}$ с
8	Линза для подсветки шкалы	Внутри прибора	К8	-	Нормальный режим $t^{\circ} + 20^{\circ}$ с
9	Оборачивающая линза	Внутри прибора	КФ4	$V = 0,5^{\text{X}}$ $f^{\wedge} = 10\text{мм}$	Динамический режим с перепадом температур

Таблица 7.4

№	Назначение призмы	Размещение в приборе	Материал призмы	Условия работы прибора
1	Компенсация вращения изображения	Перед объективом	БК10	Полевой прибор
2	Окулярная призма	Перед окуляром	К8	Лабораторные условия
3	Окулярная призма	Вблизи плоскости изображения	БК10	Нормальный режим $t + 20^{\circ} \text{C}$
4	Для излома оптической оси	После объектива	К8	Полевой прибор
5	Для раздвижки баз бинокулярного прибора	Перед окуляром	БК10	Нормальный режим $t + 20^{\circ} \text{C}$
6	Излом оптической оси	После объектива	К8	Нормальный режим $t + 20^{\circ} \text{C}$
7	Отклонение оси на 90°	После объектива	К8	Динамический режим
8	Смещение оси	Перед объективом	БК10	Нормальный режим $t + 20^{\circ} \text{C}$
9	Компенсация вращения изображения	Перед объективом	К8	Полевой прибор
10	Окулярная призма	Вблизи плоскости изображения	К8	Нормальный режим $t + 20^{\circ} \text{C}$
11	Для излома оптической оси	После объектива	БК10	Полевой прибор
12	Окулярная призма	Вблизи плоскости изображения	К8	Лабораторные условия

Лабораторная работа №8

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПАРАКСИАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И АБЕРРАЦИЙ СКЛЕЕННОГО ДВУХЛИНЗОВОГО ОБЪЕКТИВА

Цель работы. Ознакомление с пакетом прикладных программ по расчету оптических систем «ОПАЛ»[^] (расчет параксиальных характеристик, составление объектного модуля ОС, расчет сумм Зейделя, определение габаритов системы, расчет монохроматических и хроматических aberrаций).

Оборудование и принадлежности к работе

1. Персональный компьютер – 1 шт.
2. Программа ОПАЛ – 1 шт.
3. Электронный ключ защиты. – 1 шт.

Основные положения

Задача анализа оптической системы (ОС) состоит в определении внутренних и внешних характеристик ОС по известным значениям конструктивных параметров.

Гауссовы (параксиальные) характеристики

F – переднее фокусное расстояние в мм;

F' – заднее фокусное расстояние в мм;

SF – передний фокальный отрезок в мм;

SF' – задний фокальный отрезок в мм;

SH – расстояние от вершины первой поверхности до передней главной точки (мм);

SH' – расстояние от вершины последней поверхности до задней главной точки (мм);

S – передний отрезок (мм или диоптр.);

S' – рабочий задний отрезок (мм или диоптр.) для плоскости регистрации изображения (величина изображения определяется в плоскости установки, соответствующей отрезку S');

S'_g – задний отрезок (мм или диоптр.) для плоскости изображения, сопряженного с предметом;

V – обобщенное увеличение.

$S_p(S'_p)$ – положение входного (выходного) зрачка ОС.

Определение габаритов пучков. Габариты пучков описываются размерами входного и выходного зрачка в обобщенных координатах и задаются обобщенными апертурами. Зрачок аппроксимируется эллипсом, полуоси которого A_X и A_Y . Рассчитывается также положение зрачка, т.е. положение точки пересечения главного луча с осью.

Габариты пучков определяются путем подгонки габаритных лучей к крайним точкам, заданных виньетированием и высотой или апертурой областей на АД для каждого пучка.

Просмотр габаритов пучков. В табличной форме для всех пучков выводится:

– *передняя (задняя) апертура* – показывает полуразмеры пучка на входе (выходе) ОС в сечениях X и Y , выраженных в обобщенных зрачковых координатах. Для удаленного предмета (изображения) мм, для близкого – произведение показателя прохождения преломления на синус апертурного угла;

– *положение входного (выходного) зрачка* – расстояние от первой (последней) поверхности до точки пересечения главного луча с оптической осью;

– *виньетирование* – отношение срезанной части пучка на АД к половине ее диаметра отдельно для верхней и нижней части пучка на диафрагме;

– *светораспределение* – отношение площадей входного (выходного) зрачков в обобщенных координатах к площади зрачка для осевого пучка основной длины волны. На выходе для близкого расстояния это функция освещенности изображения, а для дальнего – сила света.

Координаты лучей. Координаты габаритных лучей пучков, максимальные световые высоты на поверхностях и «стрелки» прогиба по ним, координаты главного, верхнего и нижнего меридиональных лучей и бокового (сагиттального).

Особые ситуации: Н – непопадание; О – полное внутреннее отражение; К – острый край; Г – прохождение за габаритами.

Рисунок оптической системы – в графическом режиме; с помощью клавиш «SPACE» – выделение фрагмента рисунка;

F4 – параметры текущей поверхности; F6 – из выделенного фрагмента вернуться на полный рисунок.

Суммы Зейделя. Пять монохроматических сумм Зейделя ($S_I, S_{II}, S_{III}, S_{IV}, S_V$) и две хроматические суммы ($S_{I_{XP}}$ и $S_{II_{XP}}$) соответствуют соответствующим абберациям III порядка между максимальной и минимальной рабочей длиной волн.

Суммы Зейделя выводятся для каждой поверхности (поверхностные коэффициенты) и их итоговое значение.

Характеристики главных лучей пучков. Координаты точек поля и аберрации главного луча (дисторсия, астигматизм, хроматизм увеличения):

- величина предмета (изображения) в мм или угловой мере;
- относительная величина предмета (изображения): отношение величины предмета (изображения) данного пучка к максимальным размерам поля;
- дисторсия (в абсолютной и относительной мере);
- астигматические отрезки Z'_m и Z'_s в мм для близкого изображения; в диоптр. для удаленного как величины, обратные расстоянию в метрах от выходного зрачка до фокусов, в которые собираются лучи бесконечно узких пучков в меридиональном и сагиттальном сечении в окрестностях главного луча минус обратные расстояния в м от выходного зрачка до плоскости Гаусса;
- хроматизм увеличения (абсолютный и относительный);
- хроматизм положения (разность величин отрезков для данной длины волны и основной).

Аберрации осевого пучка. Поперечные аберрации (мм или угловых величинах), а продольные (мм или дптр.).

Волновые аберрации (в длинах волн основного цвета).

Количество лучей не более 8.

Хроматические аберрации:

- <Аберрация> – значения хроматических аберраций для текущих длин волн;
- <разностный> – разности значений хроматических аберраций для текущей и основной длины волны;
- <вторичный спектр> – «первичный хроматизм» (разность аберраций на λ_{\max} и λ_{\min}) и «вторичный хроматизм» (разность «первичного» и аберрации на основной длине волны).

Аберрации лучей внеосевых пучков. Расчет в меридиональном, сагиттальном и «косом» сечениях пучка (поперечные и волновые аберрации).

Для сагиттального сечения пучка две составляющие: меридиональная (D'_y) и сагиттальная (D'_x).

Для «косого» сечения необходимо задавать азимутальный угол сечения с меридиональной плоскостью.

Анализ качества изображения

Волновые аберрации (разложение Цернике). Каждый зональный коэффициент полиномов Цернике имеет марку $CX|S$, где X – степень разложения по хроматизму; $|$ – степень разложения по радиусу на зрачке; S – сте-

пень разложения по азимуту. Вывод коэффициентов в текстовом режиме, а в графическом – вывод гистограмм вклада в волновой критерий аберраций различных порядков (СКВ).

Вычисление плоскости наилучшей установки ПНУ. Вычисление параметров ПНУ производят для каждого пучка и в целом (общая ПНУ). К параметрам ПНУ относятся: оптимальные дефокусировки dS , значения волнового критерия (СКВ) – среднеквадратическая полихроматическая волновая аберрация и значения геометрических критериев dx , dy . (среднеквадратические сагиттальные и меридиональные поперечные аберрации), СКР – среднеквадратический полихроматический размер поперечной аберрации в целом

Положение ПНУ – общая оптическая расфокусировка определяется как среднее всех положений.

Анализ структуры изображения.

Определение полихроматических характеристик. При задании в ОС нескольких длин волн характеристики рассчитываются с учетом заданной функции спектральной эффективности, которая показывает вес длиной λ в вычисляемой полихроматической характеристике.

Точечные диаграммы (ТД). Для определенного номера пучка можно детализировать (клавиша «Пробел»), далее произвести расчет концентрации полихроматической энергии в этой части изображения (клавиша «Enter»).

Фокусировочные диаграммы. Рассчитываются для фиксированного количества лучей, выводится в графическом режиме для номинальной и четырех сдвинутых плоскостей изображения ($\pm DS, \pm 2DS$).

Функция концентрации энергии (ФКЭ). Зависимость энергии пятна рассеяния от величины диаметра D . Центр кружка совпадает с положением луча основного цвета. ФКЭ выводится для 20 различных диаметров кружков. Смещение центра задается (Edit).

Геометрическая ОПФ. ЧКХ рассчитывается до 20 значений пространственных частот, (безабберационная ЧКХ, которая определяется с учетом дифракции). Результаты можно получить в текстовом или графическом режиме.

Функция рассеяния точки (ФРТ). Квадрат модуля от преобразования Фурье зрачковой функции (ЗФ), включающей в себя контур зрачка и волновую аберрацию. При расчете учитывается симметрии ЗФ. При этом рассчитывается число Штреля.

Функция концентрации энергии (ФКЭ). ФКЭ показывает зависимость энергии ФРТ, содержащейся в круге определенного диаметра, от величины этого диаметра. Центр кружков определяется из условия максимума энергии на максимальном кружке.

Анализ изображения в геометрическом приближении (G/A). Рекомендуется, когда геометрический размер пятна рассеяния значительно превосходит размер кружка Эри. Вычисляют: ТД – точечные диаграммы; ЧКХ – частотно-контрастные характеристики; ФКЭ, ФКЛ. Учитывается центральное экранирование. При задании нескольких λ рассчитывают полихроматические характеристики.

Порядок выполнения работы

1. Составить объектный модуль заданного варианта ОС.
2. Определить:
 - а) SD – расстояние от предыдущей поверхности до АД;
 - б) ND – число поверхностей до АД;
 - в) поле зрения ОС;
 - г) переднюю и заднюю апертуру ОС;
 - д) спектральный диапазон работы ОС.
3. Рассчитать суммы Зейделя.
4. Рассчитать сферическую aberrацию, хроматизм положения, астигматизм, дисторсию.
5. Рассчитать aberrации широкого внеосевого пучка и определить величину комы.
6. Распечатать исходные данные и результаты расчета в виде графиков и таблиц.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Основные сведения из теории.
3. Назначение программной системы «ОПАЛ».
4. Исходные данные для работы.
5. Таблицы, графики aberrаций.
6. Заключение о качестве изображения ОС.

Варианты заданий

№	S_1 мм	y_1 мм	t_1 мм	D мм	r	d	Марка стекла
1	2	3	4	5	6	7	8
1	-200	25	-2	20	135,83 -33,19 -69,82	2,5 5,0	Ф4 БК8
2	-700	40	0	45	239,3 -208 -206,5 -1219	23,7 1,11 18	ТК21 ТФ4
3	-80	8	-5	10	-49,5 -15,922 88,72 -31,92	4,96 0,5 4,2	К8 К8
4	-1000	30	-15	60	897,4 210,9 208,4 -363,9	9 0,1 20	Ф1 К8
5	-500	25	-10	30	153,46 -45,71 -440,6	5 2	К14 ЛФ10
6	-120	25	-3	8	21,91 -14,25 -44,82	2,5 1,2	К19 ТФ1
7	-400	20	0	80	181,97 -110,6 -111,69 -436,5	5 0,05 4	К8 Ф4
8	-250	25	-5	18	45,08 -32,43 -98,17	3,9 2,2	К8 ТФ1
9	-300	8	-5	18	72,44 -75,16 -544,5	3 1,5	К8 ТФ4
10	∞	5°	0	100	381,9 -338,1 ∞	11,2 10	ТК16 ТФ4
11	-500	20	-1	22	99,08	4	К8

					-102,8 -744,7	2	ТФ4
12	∞	5°	0	125	669,9 -642,7 -609,5 -2480	15 2 12	ТК17 ТФ4

Примечание: S' – расстояние от первой поверхности объектива до предмета; t_1 – расстояние от первой поверхности объектива до входного зрачка; y_1 – величина предмета; D – диаметр входного зрачка; $\lambda_{\text{расч}}=0.546$ мкм – линия «e».

Варианты 1, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 15 описывают склеенные объективы; $n_1=n_4=1$. Остальные варианты описывают расклеенные объективы; $n_1=n_3=n_5=1$.

Лабораторная работа №9

ИССЛЕДОВАНИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ПУЧКОВ В РЕАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Цель работы: углубление знаний по разделу «Ограничение пучков лучей в оптических системах», приобретение практических навыков в определении положения входного и выходного зрачков, в расчёте величин угловых и линейных полей оптических систем.

Оборудование и принадлежности к работе

- | | |
|-----------------------------|---------|
| 1. Персональный компьютер | – 1 шт. |
| 2. Программа ОПАЛ | – 1 шт. |
| 3. Электронный ключ защиты. | – 1 шт. |

Краткая теория

Ограничение световых пучков, проходящих через оптическую систему, обусловлено наличием диафрагм.

Апертурной диафрагмой (АД) называют диафрагму, ограничивающую пучок лучей, выходящий из осевой точки предмета. Такая диафрагма определяет количество энергии, проходящей через оптическую систему.

Входной зрачок – параксиальное изображение АД в пространстве предметов. Выходной зрачок – параксиальное изображение АД в пространстве изображений. Если АД расположена в пространстве предметов, то она и есть входной зрачок. Аналогично для пространства изображений. Входной, выходной зрачки и апертурная диафрагма сопряжены между собой.

Входной зрачок виден из осевой точки предмета под наименьшим углом, равным образом выходной зрачок наблюдается из осевой точки изображения под наименьшим углом.

Луч, идущий из осевой точки предмета и проходящий через край входного зрачка (край АД), называется апертурным лучом в пространстве предметов. Угол σ_A между ним и оптической осью называется апертурным углом в пространстве предметов. Аналогично угол σ'_A – апертурный угол в пространстве изображений.

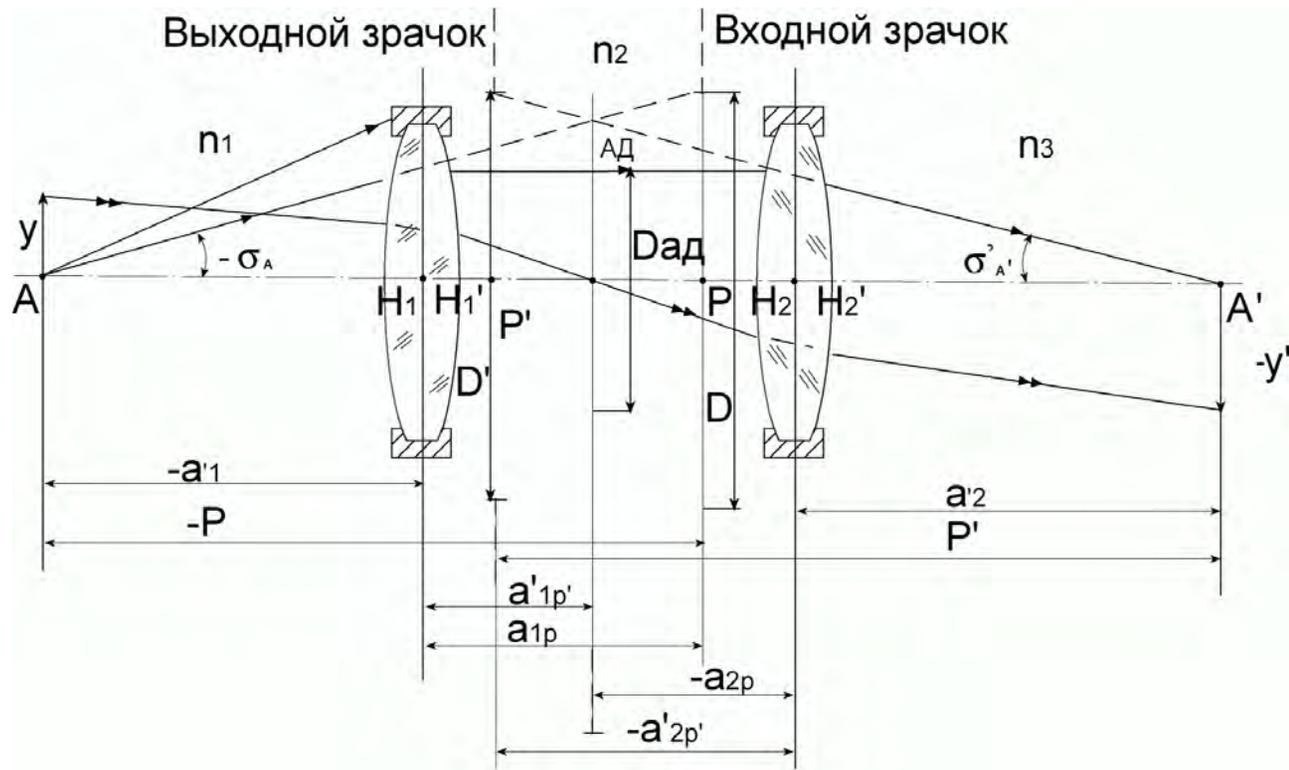


Рис. 9.1. Апертурная диафрагма и зрачки оптической системы

Из рисунка 9.1 имеем:

$$\operatorname{tg} \sigma_A = \frac{D}{2\rho} = \frac{D}{2(a_1 - a_{1p})}, \quad \operatorname{tg} \sigma'_{A'} = \frac{D'}{2\rho'} = \frac{D'}{2(a'_2 - a'_{2p'})} \quad (9.1)$$

где D – диаметр входного зрачка; D' – диаметр выходного зрачка; ρ – расстояние от предмета до входного зрачка; ρ' – расстояние от изображения до выходного зрачка.

Углы σ_A и $\sigma'_{A'}$ связаны зависимостью:

$$\frac{n_1 \sin \sigma_A}{n_3 \sin \sigma'_{A'}} = \beta, \quad (9.2)$$

где n_1 и n_3 – показатели преломления сред в пространстве предметов и изображений.

Обычно положение АД задано. На рис. 9.1 оно определено отрезками a'_{1p} и a_{2p} .

Для определения положения входного зрачка нужно найти изображение АД через часть ОС, предшествующую диафрагме. Расстояние от передней главной точки первого компонента до осевой точки входного зрачка a_{1p} определяется по формуле:

$$a_{1p} = \frac{n_1 f'_1 a'_{1p}}{n_2 (f'_1 - a'_{1p})}, \quad (9.3)$$

где f'_1 – заднее фокусное расстояние первого компонента, n_2 – показатель преломления пространства между компонентами, a'_{1p} – расстояние от задней главной точки первого компонента до апертурной диафрагмы.

Для определения положения выходного зрачка необходимо найти изображение апертурной диафрагмы через часть оптической системы, следующую за диафрагмой. Расстояние от последнего компонента до плоскости выходного зрачка a'_{2p} определяется по формуле:

$$a'_{2p} = \frac{n_3 f'_2 a_{2p}}{n_3 a_{2p} + n_2 f'_2}, \quad (9.4)$$

где f'_2 – заднее фокусное расстояние второго компонента; a_{2p} – расстояние от передней главной точки второго компонента до апертурной диафрагмы.

Для системы в воздухе:

$$a_{1p} = \frac{f'_1 a'_{1p}}{(f'_1 - a'_{1p})}, \quad a'_{2p} = \frac{f'_2 a_{2p}}{(a_{2p} + f'_2)}. \quad (9.5)$$

Диаметр входного зрачка равен:

$$D = \frac{D_{АД} a_{2p}}{a'_{1p}}. \quad (9.6)$$

Диаметр выходного зрачка равен:

$$D' = \frac{D_{АД} a'_{2p}}{a_{2p}}. \quad (9.7)$$

Абсолютное значение отношения диаметра входного зрачка к заднему фокусному расстоянию системы D/f' , называется относительным отверстием. Величина, обратная относительному отверстию, называется диафрагменным числом K .

$$D/f' = 1 : K \quad (9.8)$$

Луч, идущий из крайней точки предмета (изображения) через центр входного (выходного) зрачка, называют главным лучом в пространстве предметов (изображений) (на рис. 9.1 этот луч с двойной стрелкой).

Ограничение *поля зрения* производится с помощью полевой и виньетирующей диафрагм. Диафрагма, расположенная в плоскости предмета или в одной из плоскостей, с ней сопряжённых, и ограничивающая размер поля зрения в пространстве изображений, называется *полевой* диафрагмой (ПД). Любая материальная диафрагма, кроме АД и ПД, которая ограничивает пучки лучей, выходящих из точек предмета вне оптической оси, называется *виньетирующей*.

Поле ОС для предмета на конечном расстоянии характеризуется линейной величиной, а для предмета в бесконечности угловой величиной (рис. 9.2, а, б). Если предмет расположен в бесконечности (рис. 9.2б), то имеем: $y' = -f' \operatorname{tg} \omega$.

Линейное поле в пространстве предметов $2y$, в пространстве изображений $2y'$. Угловые поля 2ω и $2\omega'$ – это углы в пространстве предметов и в пространстве изображений между главными лучами.

Связь между линейными полями системы в пространстве предметов и в пространстве изображений осуществляется через линейное увеличение $\beta : 2y' = \beta \cdot 2y$.

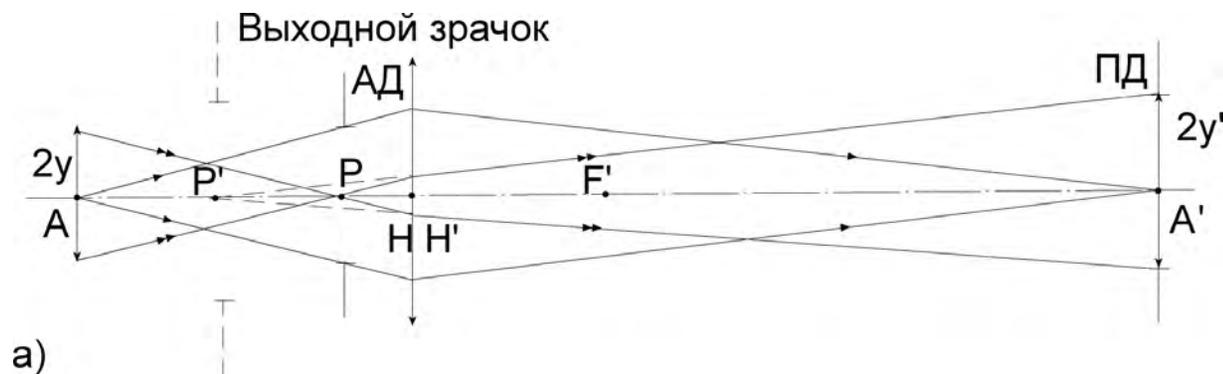


Рис. 9.2. а) Линейное поле оптической системы.

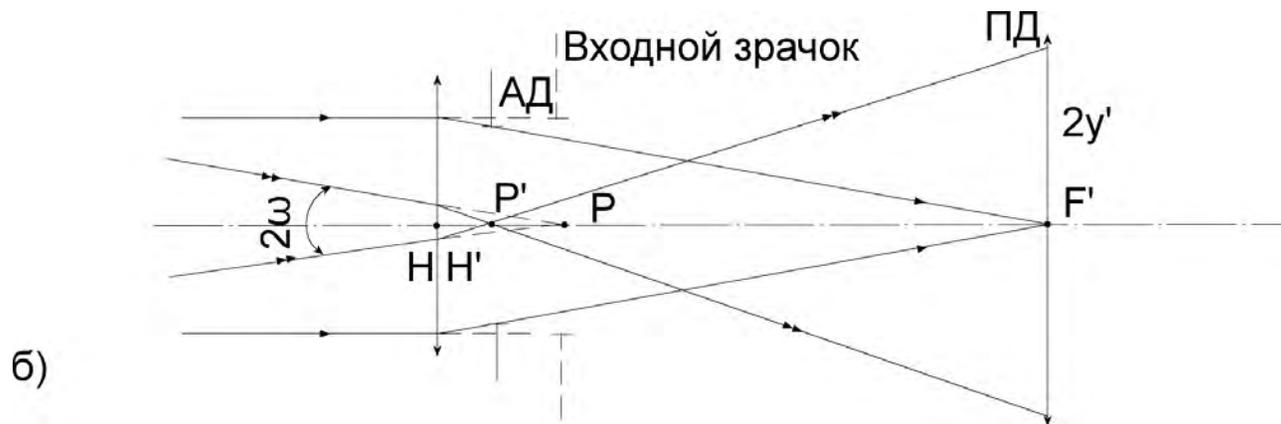


Рис. 9.2. б) Угловое поле оптической системы.

Угловые поля в пространстве предметов и в пространстве изображений связаны угловым увеличением в зрачках γ_p или линейным увеличением в зрачках β_p : $tg\omega' = \gamma_p tg\omega = \frac{tg\omega}{\beta_p}$, где $\beta_p = \frac{D'}{D}$.

Порядок выполнения работы

В соответствии с индивидуальным заданием разобраться в ограничении пучков лучей в заданном объективе и выполнить необходимые расчёты по формулам и с использованием ПК.

Методические указания по выполнению работы

Все расчёты по определению положения зрачков выполнить самостоятельно, задавая АД как предмет и находя её изображение в пространстве изображений через часть ОС, следующую за диафрагмой, или её изображение в пространстве предметов через часть оптической системы, предшествующую диафрагме.

Пример расчета

Объектив с заданными конструктивными параметрами (табл.1) представлен на рисунке 9.3.

r , мм	d , мм	Марка стекла
37,11		
	7,5	ТК23
0		
	9,2	
-60,81		
	2,8	Ф4
37,67		
	9,6	
123,31		
	6,0	ТК20
-47,42		

Определить положение и диаметр входного и выходного зрачков. АД расположена на расстоянии 2,9 мм от 4-ой поверхности. Относительное отверстие объектива 1:2,8. Предмет находится в бесконечности. Угловое поле $2\omega = 24^\circ$. Сделать чертёж, показать ход главного луча.

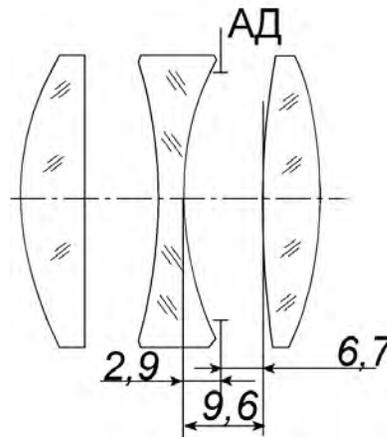


Рис. 9.3. Объектив с заданными конструктивными параметрами.

По заданным конструктивным параметрам объектива можно определить на ПК f' объектива. Для данного объектива $f' = 100,267$ мм. Можно найти диаметр входного зрачка $D = \frac{f'}{2,8} = \frac{100,267}{2,8} = 35,8$ мм.

Определяем положение входного зрачка. Разобьём объектив на две части: ч. 1 (с 1 по 4 поверхность) до АД, и ч. 2 (с 5 по 6) за апертурной диафрагмой. Рассмотрим предшествующую АД часть ОС (рис. 9.4).

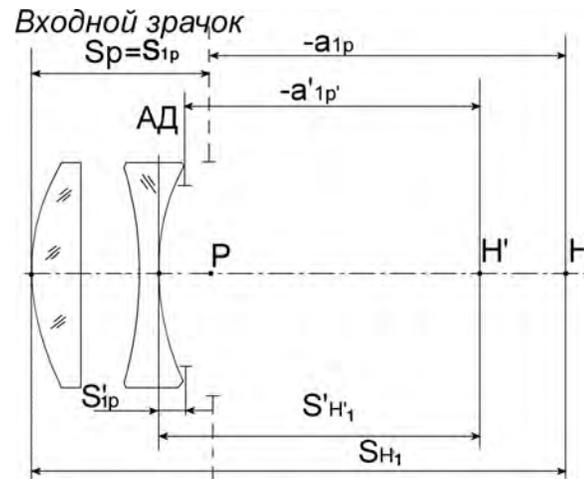


Рис. 9.4. Определение положения входного зрачка

АД расположена на расстоянии $S'_{1p} = 2,9$ мм от последней поверхности рассматриваемой системы.

Определим с помощью ПК параксиальные характеристики части 1:

f_1	f'_1	S_{F_1}	S'_{F_1}	S_{H_1}	S'_{H_1}
205,661	-205,661	289,716	-1,57	84,053	48,396

Найдём расстояние a'_{1p} – от задней главной плоскости до АД: $-a'_{1p} = S'_{H_1} - S'_{1p} = -45,493$ мм.

По формуле $\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'}$ определяется положение входного зрачка (изображение его – АД):

$$a_{1p} = \frac{a'_{1p} f'_1}{f'_1 - a'_{1p}} = \frac{-45,493(-205,661)}{-205,661 - (-45,493)} = -58,414 \text{ мм.} \quad S_{1p} = S_{H_1} + a_{1p} = 84,053 - 58,415 = 25,635 \text{ мм.}$$

Найдём диаметр апертурной диафрагмы: $D_{АД} = \beta_{p_1} D = \frac{a'_{1p}}{a_p} D$. Подставляя найденные значения, получим:

$$D_{АД} = \frac{-45,493}{-58,414} \cdot 35,8 = 27,98 \text{ мм.}$$

После выполненных расчетов производим проверку расчета на ПК.

Определим положение выходного зрачка. Расстояние между 1-й и 2-й частями системы задано – это d_4 .

Рассмотрим следующую за апертурной диафрагмой часть оптической системы (часть 2) (рис. 9.5).

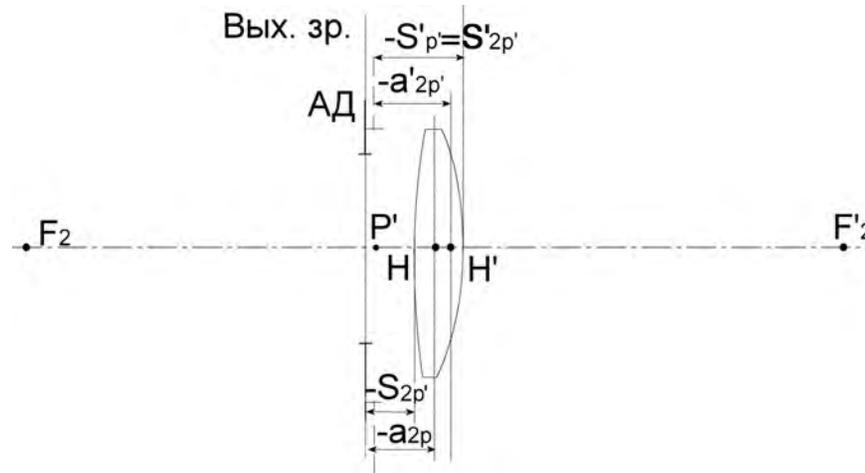


Рис. 9.5. Определение положения выходного зрачка.

Предмет – АД находится на расстоянии $-S_{2p'}$ от первой поверхности рассматриваемой части:

$$-S_{2p'} = S'_{1p} - d_4 = 2,9 - 9,6 = -6,7 \text{ мм.}$$

Определим с помощью ПК параксиальные характеристики 2-й части:

f_2	f'_2	S_{F_2}	$S'_{F'_2}$	S_{H_2}	$S'_{H'_2}$
-55,57	55,57	-52,87	54,53	2,7	-1,03

Найдём расстояние a_{2p} – от передней главной плоскости до АД: $a_{2p} = -S_{2p'} - S_{H_2} = -6,7 - 2,7 = -9,4$ мм. Положение $a'_{2p'}$ выходного зрачка определится по формуле:

$$a'_{2p'} = \frac{a_{2p} f'_2}{f'_2 + a_{2p}} = \frac{-9,4 \cdot 55,57}{55,57 - 9,4} = -11,31 \text{ мм.}$$

Расстояние от последней поверхности до выходного зрачка:

$$S'_{p'} = S'_{2p'} = a'_{2p'} + S_{H_2} = -11,31 - 1,03 = 12,34 \text{ мм.}$$

Диаметр выходного зрачка:

$$D' = \frac{a'_{2p'}}{a_{2p}} D_{АД} = \frac{-11,31}{-9,4} \cdot 27,9 = 1,203 \cdot 27,9 = 33,57 \text{ мм.}$$

Далее производим проверку расчетов на ПК.

Рассмотрим *всю систему в целом*.

Положение входного зрачка S_p и его диаметр D , положение выходного зрачка $S'_{p'}$ – известны (на рис. 9.6 показан ход главного луча). Величина изображения равна $2y' = 2f' \operatorname{tg} \omega = 2 \cdot 100,267 \cdot \operatorname{tg} 12^\circ = 44,6$ мм.

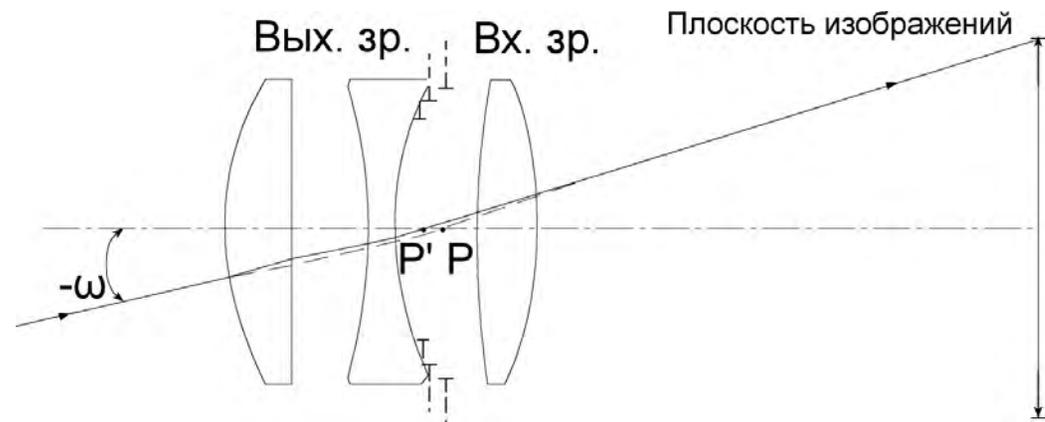


Рис. 9.6. Ход главного луча и положение зрачков в объективе.

Содержание отчета

В отчёте должны быть приведены:

1. Последовательность решения задачи и необходимые расчёты.
2. Чертежи, иллюстрирующие перенос АД в пространство предметов и в пространство изображений.
3. Чертежи объектива с указанием положения и диаметров входного и выходного зрачков, АД.
4. Ход главного луча или световые диаметры, если это указано в задании.
5. Вид входного зрачка для осевой точки и края поля, если в системе есть виньетирование.

Варианты заданий

Вариант №1. Апертурная диафрагма расположена на расстоянии 1,88 мм от 4-й поверхности. Относительное отверстие объектива 1:3,5. Угловое поле: $2\omega = 10^\circ$. Определить диаметр АД. Сделать чертеж, показать ход главного луча; предмет в бесконечности. Определить положение и диаметры входного и выходного зрачков в объективе со следующими конструктивными данными:

r , мм	d , мм	Марка стекла
17,1		
∞	2,85	ТК 16
	4,05	
-33,57		
	0,90	ЛФ 5
14,56		
	5,05	
245,50		
	0,80	ОФ 1
15,17		
	5,10	ТК 16
-23,53		

Вариант №2. Передний отрезок $S = -0,76$. В пространстве предметов телецентрический ход главного луча. Числовая апертура в пространстве предметов 0,6. Выполнить чертеж, показать ход главного луча, определить световые диаметры. Определить положение и диаметры входного и выходного зрачков, АД в объективе со следующими конструктивными данными:

r , мм	d , мм	Марка стекла
∞		
	1,72	КЗ
-1,85		
	0,22	
∞		

	1,30	ТФ2
4,17		
	1,50	К3
-4,60		
	3,45	
26,53		
	1,0	Ф9
5,59		
	1,8	К3
-7,98		

Вариант №3. В пространстве изображений телецентрический ход главного луча, предмет в бесконечности, относительное отверстие 1:1, $2\omega = 5^\circ$. Определить положение и диаметры входного и выходного зрачков, апертурной диафрагмы в объективе со следующими конструктивными данными:

r , мм	d , мм	Марка стекла
19,861		
	4,31	ЛК 6
-17,061		
	1,68	ТФ 3
-70,80		
	22,22	
5,549		
	3,62	КФ 7
-15,776		
	1,26	ТФ 5
94,41		
	0,09	
2,992		
	3,26	ТК 1
2,109		

Вариант №4. Числовая апертура $A=0,5$, расстояние от первой поверхности до предмета $S = -0,53$ мм, $2y=0,5$. Определить положение и размер апертурной диафрагмы, а также входного и выходного зрачков в объективе с телецентрическим ходом главного луча в пространстве предметов со следующими конструктивными данными:

r , мм	d , мм	Марка стекла
-2,109		
	3,26	ТК 16
-2,992		
	0,09	
-94,41		
	1,26	ТФ 5
15,776		
	3,62	КФ 7
-5,649		
	22,22	
70,80		
	1,68	ТФ 3
17,061		
	4,31	ЛК 6
-19,861		

Вариант №5. Относительное отверстие 1:2, $2\omega = 5^\circ$. Предмет в бесконечности. Построить ход главного луча. Определить положение и диаметр апертурной диафрагмы, расположенной после 5-ой поверхности, а также выходного зрачка, если расстояние $S_p = 83$ мм, а конструктивные данные следующие:

r , мм	d , мм	Марка стекла
63,326		
	4,5	БК10
342,82		
	0,3	
37,544		
	10,2	Л 3

-201,148		
24,110	20,3	Ф6
62,888	20,95	
123,34	3,1	ТФ8

Вариант №6. Апертурная диафрагма совпадает с 4-ой поверхностью, относительное отверстие объектива 1:5, поле зрения $2\omega = 10^\circ$. Определить положение и диаметры входного и выходного зрачков, начертить объектив, показать ход главного луча, предмет в бесконечности. В объективе конструктивные данные:

r , мм	d , мм	Марка стекла
-50,0		
-70,0	20,0	К8
-100,0	30,0	+1
-70,0	-30,0	-1
		+1

Вариант №7. Относительное отверстие 1:8, апертурная диафрагма расположена посередине между линзами, $2\omega = 60^\circ$. На чертеже показать ход главного луча. Предмет в бесконечности. Определить линейное поле в пространстве изображений и световые диаметры линз, если виньетирование отсутствует. Определить положение и диаметры входного и выходного зрачков в системе со следующими конструктивными данными:

r , мм	d , мм	Марка стекла
8,57		
8,63	2,21	К 14
	13,78	

-8,63		
	2,21	K14
-8,57		

Вариант №8. Относительное отверстие 1:6. Начертить систему, показать ход главного луча, определить световые диаметры, если виньетирование отсутствует, $2\omega = 5^\circ$. Определить положение и диаметры входного и выходного зрачков, если апертурная диафрагма совпадает со 2-ой поверхностью, в системе со следующими конструктивными данными:

r , мм	d , мм	Марка стекла
		1,0
-253,943		
	-73,08	-1,0
-273,316		
	49,80	1,0
-594,86		
	1,50	1,5183
30,156		
	1,50	1,0
146,359		
	3,0	1,5183
-34,387		
		1,0

Вариант №9. Апертурная диафрагма расположена на расстоянии 11,5 мм от 2-ой поверхности. Определить диаметр АД, входного и выходного зрачков, а также положение зрачков, на чертеже показать ход главного луча. Предмет в бесконечности. Найти $2y'$, если $2\omega = 60^\circ$, относительное отверстие 1:6. В объективе конструктивные данные:

r , мм	d , мм	Марка стекла
20,8		
	11,4	ТК 16
21,6		

	23,0	
-21,6		
	11,4	ТК16
-20,8		

Вариант №10. Апертурная диафрагма расположена на расстоянии 5 мм после 4-ой поверхности, предмет в бесконечности, $\sin\sigma' = 0,1$. Определить положение и диаметры входного и выходного зрачков, диаметр апертурной диафрагмы, световые диаметры линз, если виньетирование составляет 10% снизу, $2\omega = 5^\circ$.

Объектив имеет следующие конструктивные данные:

r , мм	d , мм	Марка стекла
30,0		
	5,7	ТК 16
1100,0		
	6,2	
-74,0		
	1,9	БФ 12
30,0		
	10,3	
175,0		
	3,8	ТК 16
-49,0		

Вариант №11. Относительное отверстие 1:4, $2\omega = 40^\circ$. Апертурная диафрагма расположена после 4-ой поверхности на расстоянии 2 мм. Определить:

1. положение и диаметры входного и выходного зрачков;
2. диаметр апертурной диафрагмы;
3. линейное поле в пространстве изображений, предмет в бесконечности;
4. световые диаметры, если виньетирование сверху и снизу 25%.

В объективе следующие конструктивные данные:

r , мм	d , мм	Марка стекла
25,29		
	7,7	ТК 16
-1900,60		
	6,0	
-41,58		
	4,0	ТФ 1
21,04		
	6,0	
46,56		
	7,7	ТК 16
-31,68		

Вариант №12. В системе со следующими конструктивными данными и $\sin \sigma' = 0,2$, $2\omega = 30^\circ$:

r , мм	d , мм	Марка стекла
39,98		
	12,2	ТК 16
-30004,9		
	9,5	
-65,739		
	6,3	ТФ 1
33,264		
	9,5	
73,613		
	12,7	ТК 16
-50,087		

Определить:

1. положение и диаметры входного и выходного зрачков, если апертурная диафрагма расположена после 4-ой поверхности на расстоянии 1,5 мм;
2. диаметр апертурной диафрагмы;
3. линейное поле в пространстве изображений; передний отрезок $S = -20$ мм;
4. световые диаметры линз, виньетирования нет.

Вариант №13. В системе со следующими конструктивными данными и $D=40$ мм, $2y'=20$ мм, апертурная диафрагма расположена на расстоянии 1,5 мм от 4-ой поверхности:

r , мм	d , мм	Марка стекла
19,99		
	6,1	ТК 16
-1502,45		
	4,8	
-32,87		
	3,2	ТФ 1
16,632		
	4,8	
36,807		
	6,1	ТК 16
-25,043		

Определить:

1. положение входного и выходного зрачков;
2. диаметры апертурной диафрагмы и выходного зрачка;
3. линейное поле в пространстве предметов; предмет расположен на расстоянии 10 м от объектива;
4. построить ход главного луча.

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 aberrаций";
 - например, произвести расчет aberrаций 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.

Лабораторная работа № 10 ИССЛЕДОВАНИЕ ЯРКОСТИ ОБЪЕКТОВ

Цель работы. Получение практических навыков работы на приборе яркомер-люксметр, измерение яркости оптических образцов абсолютным и относительным методом.

Оборудование и принадлежности

Яркомер-люксметр ЯРМ-3, приспособления, светофильтры, образцы.

Описание и принцип работы прибора

Яркомер-люксметр ЯРМ-3 (рис. 10.1) предназначен для измерения яркости постоянных источников света со сплошным спектром излучения, освещенности, создаваемой данными источниками и яркости освещаемых объектов с неселективным отражением. Применяется в оптико-механической, полиграфической и др. отраслях.



Рис.10.1.Общий вид ЯРМ-3: а) блок питания; б) фотометрическая головка

В фототехнике освещенность определяют с помощью экспонометров и экспозиметров, в фотометрии – с помощью люксметров.

Достоинства прибора:

- широкий диапазон измеряемых яркостей и освещенностей;
- измерение яркости объектов малого размера;
- переменное увеличение визира;
- выход на термопечать;
- высокая производительность труда за счет применения микропроцессорной системы.

Принцип работы основан на преобразовании потока, поступающего от объекта измерения, в электрический сигнал с помощью фотоприемника (ФП). Сигнал с ФП после усиления передается на вход АЦП и далее в микропроцессорную систему МПС, которая считывает напряжение пропорциональное световому потоку, производит обработку результатов от измеряемого объекта и выдает результат на ЦТ.цифровое табло ЦТ.

Яркость измеряемого объекта:

$$L = (U_L - U_T)K_L, \quad (10.1)$$

Освещенность:

$$E = (U_E - U_T)K_E, \quad (10.2)$$

где U_L и U_E – величина сигнала, поступающего от измеряемого объекта, U_T – величина сигнала при перекрытом световом потоке, K_E (K_L) – коэффициент, учитывающий размер введенной диафрагмы, выбранный коэффициент усиления, светофильтр или ослабитель.

Схема оптическая принципиальная. Объектив 2, 3, 4, 5 изображает объект измерения в плоскости сменных полевых диафрагм 7, которые ограничивают площадку на объекте измерения (рис.10.2). Свет от площадки проходит объектив, АД (6), ПД, линзы 24 и 25, светофильтр 27, матовое стекло 28 и попадает на фотоприемник 29.

ПД имеют диаметры: 0,05; 0,15; 0,51; 4,82; 15,3 мм (в угловой мере: 3'5; 10'; 35'; 5°,5; 17°,5).

Неподвижная АД=(Ø17 мм) обеспечивает независимость показаний от расстояния до измеряемого объекта при соблюдении следующих условий:

- изображение объекта измерения в плоскости ПД должно быть больше диаметра введенной ПД;
- измеряемый объект должен быть равнорким.

Линзы 24, 25 проектируют АД на матовое стекло 28. Корректирующий светофильтр приводит спектральную чувствительность фотоумножителя к относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного света.

Подвижка вдоль оси объектива позволяет исследовать объекты, находящиеся на любом расстоянии от объектива (от бесконечности до $2f^1$). Для корректировки чувствительности яркомера в процессе эксплуатации в

схеме предусмотрен встроенный контрольный осветитель: миниатюрная лампа 31, отражающая молочная пластина 32 и нейтральное стекло НС 33. Для расширения диапазона измерения в сторону больших яркостей и освещённостей в схему введены два НС 26 с оптическими плотностями $D_1=2$ и $D_2=3$.

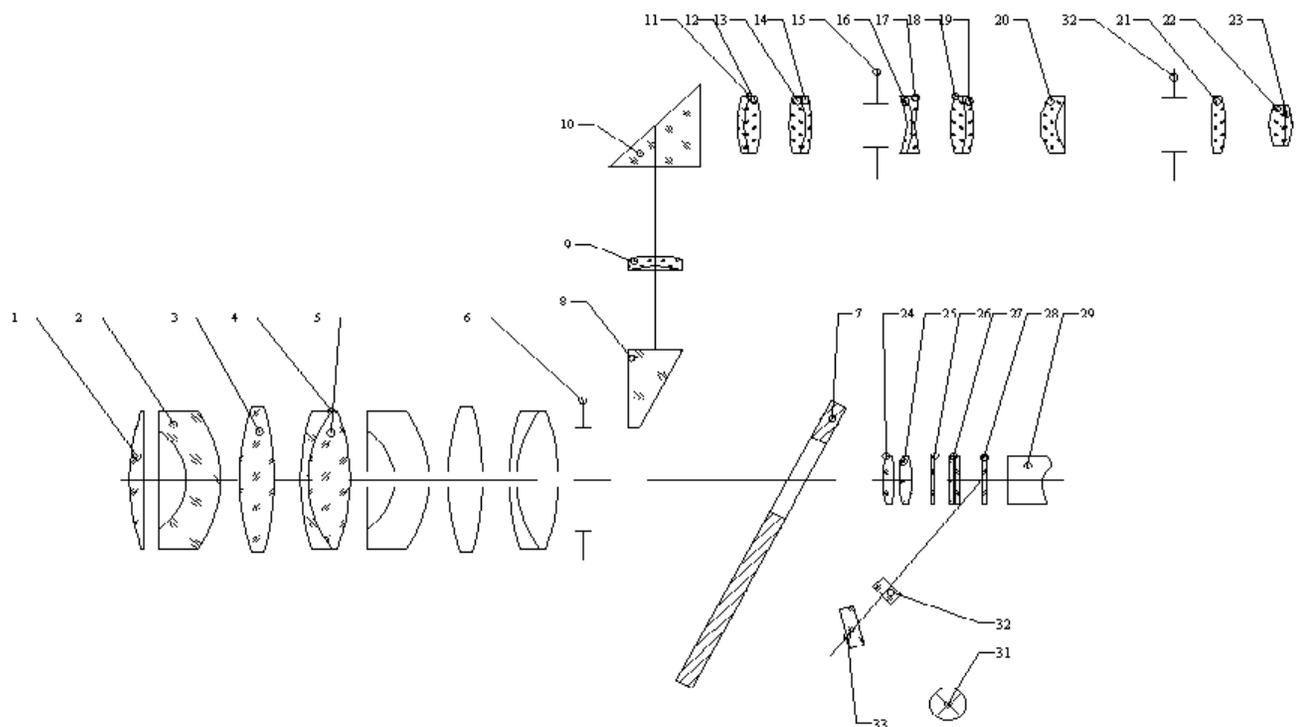


Рис.10.2. Оптическая схема

Молочная линза 1 вводится при измерении освещенности. Визирное устройство предназначено для наведения прибора на измеряемый объект. В визире виден участок измеряемой площадки вокруг ПД, введённой в ход лучей, которая расположена в фокальной плоскости объектива 9, 11, 12 визира. Направление лучей в визир осуществляется призмами 8, 10. Параллельный пучок из объектива 9, 11, 12 направляется на объектив системы переменного увеличения; передний фокус окуляра 16,17 совмещён с задним фокусом объектива 13, 14, поэтому из окуляра выходит параллельный пучок и направляется на выходной объектив 18, 19, 20 визира. ПД визира (диаметр 20 мм.) рассматривается в окуляр 21, 22, 23 имеющего 10^x . Система переменного увеличения имеет два фиксированных значения: $0,5^x$; 2^x , общее увеличение визира соответственно равно 5^x и 20^x .

Практическая часть

Подготовка к работе

Фотометрическую головку соединить с БПРУ (включить вилку сетевого кабеля в сеть 220 В, 50 Гц).

Рукоятку установить в положения:

Диафрагма – «5°,5»;

Ослабление – «0»;

Шторка – «ЗАКР»;

Визир – «ЗАКР».

Включить тумблер, загорается светодиод «СЕТЬ» (на цифровом табло ЦТ – различные символы). Нажать клавишу ПУСК на блоке управления высвечивается символ «L», после чего на ЦТ результата высвечивается величина темного сигнала в мВ, показатель степени 10, индикация «мВ», на ЦТ « ДИАФРАГМА» угловая величина введенной ПД. Если указанная информация не появилась, повторно нажать кнопку «ПУСК». Выдержать яркомер во включенном состоянии 10 минут и провести калибровку. После высвечивания на ЦТ сигнала от КО, нажать клавишу «L», рукоятку «ШТОРКА» перевести в положение «ОТКР». Яркомер направляют в сторону измеряемого объекта и прогревают в течение 50 мин.

Калибровка яркомера

Поставить рукоятки «ДИАФРАГМА» в «5.5°», «ОСЛАБЛЕНИЕ» – на «0», «ВИЗИР» и «ШТОРКА» в «ЗАКР». Нажать клавишу «КАЛИБР». По истечении некоторого времени на ЦТ высвечивается сигнал контрольного осветителя в «мВ», горит светодиод «КАЛИБР». После установления постоянства показаний (через 2-3 мин.) нажать клавишу режима измерений «L» или «E».

С помощью изучаемого прибора *можно измерять*:

1. Яркость источника «А» и неселективных светящихся (освещённых) объектов.

Первоначально нажимаем «L», открываем шторку «визир» для наводки на измеряемый объект; добиваемся резкого видения установленной ПД. После наведения на резкое видение ПД, привести изображение объекта в центр поля зрения визира. После наведения на объект шторку «ВИЗИР» закрыть, открыть шторку основного канала и снять отсчёт по ЦТ.

Определение диаметра измеряемой площадки, расположенной на любом расстоянии от яркомера:

$$D = \frac{D_{\text{пд}}(a-f)}{f}, \quad (10.3)$$

где $D_{\text{пд}}$ – диаметр введенной ПД, мм; фокусное расстояние объектива $f'=50$ мм; a – расстояние от объектива до измеряемого объекта, мм.

2. Яркость селективных источников.

В этом случае реализуется относительный метод. Яркость измеряемого объекта сравнивается с объектом известной яркости с тем же спектральным составом. Для этого нажать «L», а затем «T». На ЦТ высвечивается результат:

$$T = \frac{L_2}{L_1} \quad (10.4)$$

3. Неравномерность яркости объектов.

Нажать «L», а затем «H». Измеряется два участка с неравномерностью освещения одного объекта:

$$H_2 = \frac{L_2 - L_1}{(L_2 + L_1)} \quad (10.5)$$

где L_2 и L_1 – яркости соответственно первого и второго участков.

При наведении яркомера на третий участок, можно получить:

$$H_3 = \frac{L_3 - L_2}{(L_3 + L_2)} \quad (10.6)$$

Измерения в режиме «H» проводятся только после работы в режиме «T» или «L».

4. Освещённости источника «А».

Для этого на объектив яркомера устанавливают линзу из молочного стекла. Нажимается клавиша «E».

5. Относительные измерения освещённостей.

Для сравнения берут источники с заранее известной яркостью: все они должны иметь спектральный состав излучения. Яркомер наводят на объект сравнения (отсчет E_1); затем на объект измерения (отсчет E_2).

По отношению освещённостей судят о силе света источников излучения:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2 R_1}{I_1 R_2} \quad (10.7)$$

где I_1, I_2 – сила света источников; R_1 и R_2 – расстояние от соответствующих источников до молочной линзы.

6. Клавиша «КОНТР» предназначена для настройки и градуировки и проверки технического состояния яркомера при эксплуатации.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Оборудование.
3. Основные сведения из теории.
4. Оптическая схема прибора, назначение.
5. Методика и ход работы.
6. Таблицы измерений. Характеристики и описание измеряемых образцов.
7. Обработка результатов измерений с оценкой точности.
8. Таблица расчетов.
9. Заключение.

Некоторые справочные данные

Таблица. Некоторые численные данные освещенности

Объекты	Освещённость, лк
Поверхность Земли солнечными лучами в полдень	100 000
При киносъёмке в студии	10 000
На футбольном стадионе (искусственное освещение)	1200
На открытом месте в пасмурный день	1000
В светлой комнате вблизи окна	100
На рабочем столе для тонких работ	400–500
На экране кинотеатра	85–120
Необходимая для чтения	30–50
Поверхность Земли от полной луны	0,2
Поверхность Земли от ночного неба в безлунную ночь	0,0003
Место работы высокой точности	$4 \cdot 10^2$ до $5 \cdot 10^3$
За пределами атмосферы, от Солнца	$1,36 \cdot 10^5$
Зрачок глаза	10^{-9}

Требования к выполнению лабораторных работ

Техника безопасности при работе на приборах

1. При выполнении лабораторных работ с использованием осветительных оптических приборов существует опасность поражения электрическим током. Приборы должны включаться в сеть с помощью розетки с заземляющим контактом по ГОСТ 7396-76. Заземляющий контакт должен быть обязательно подключен к заземляющему контуру.
2. Перед началом работы необходимо проверить заземление трансформатора и качество изоляции электрических приборов. Наличие оголенных участков не допускается.
3. К выполнению лабораторных работ приступать только с разрешения преподавателя.

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.

КРАТКОЕ РУКОВОДСТВО ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ ПАКЕТА ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ

OPAL - PC

Общие сведения

ППП ОПАЛ-РС предназначен для проектирования, исследования (анализ, синтез, оценка качества изображения) и оптимизации оптических систем различного типа, включая децентрированные ОС и системы с асферическими поверхностями. OPAL - это аббревиатура выражения Оптический Алгоритм.

Программный комплекс приобретен в г. Санкт-Петербург, РФ.

Разработчик – коллектив кафедры «Прикладная и компьютерная оптика» Санкт-Петербургского научно-исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Программная система позволяет решать современные инженерные задачи по расчету новой оптической техники и применяется на всех ведущих предприятиях оптической отрасли Республики Беларусь. Программный комплекс используется при проведении лабораторных и практических занятий, выполнении курсового проекта по дисциплине .

1. Центрированные системы с плоскими, сферическими и асферическими поверхностями

Общие положения

В ОПАЛ-РС приняты следующие ограничения:

1. количество поверхностей в оптической системе – не более 160,
2. количество длин волн – не более 5,
3. количество внеосевых пучков – не более 5.

При вычислении показателей преломления плавок оптических материалов ширина спектрального интервала может лежать в пределах от 0.365мкм до 2.6мкм.

Угловые величины задаются действительными числами, целая часть которых дает значения угла в градусах, первые две цифры после точки в минутах, 3-4 в секундах, остальные в десятых и сотых секунды.

Например, 80.36402 – 80 градусов, 36 минут, 40.2 сек.

Для ввода новой оптической системы необходимо выбрать «Файл», далее «Новая оптическая система» и в появившемся меню указать тип оптической системы – центрированная или пространственная.

Параметры предмета (объекта)

Признак типа предмета. Значение по умолчанию: дальнего типа (Рис. 1).

- предмет ближнего типа (на конечном расстоянии)
- предмет дальнего типа («на бесконечности»).

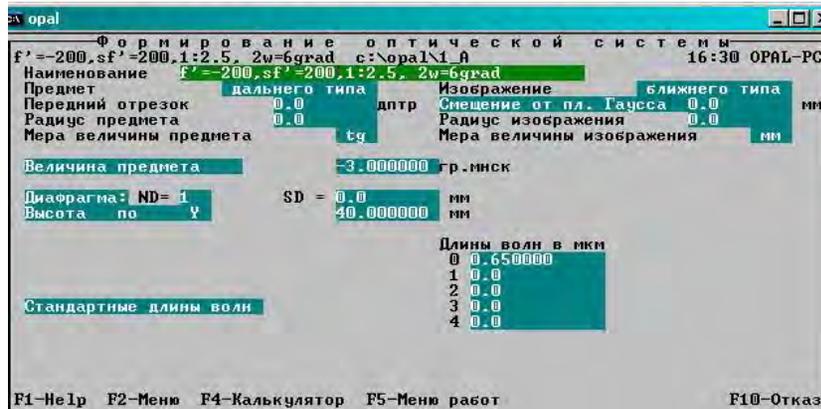


Рис. 1

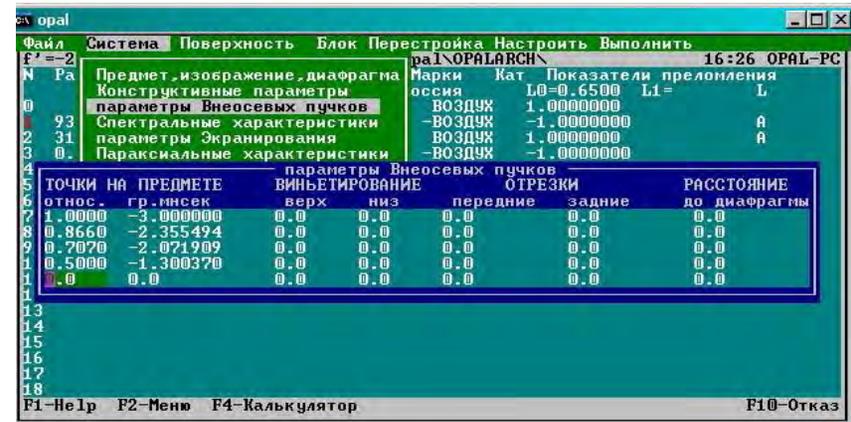


Рис. 2

Величина предмета. Для близкого предмета величина предмета указывается в мм (8.2 или -58.34).

Величина предмета дальнего типа задается как половина углового поля в пространстве предметов в градусах, минутах, секундах (например, -23.190852 означает -23 градуса, 19 минут, 8.52 секунды).

Параметры внеосевых пучков.

Допускается задание не более пяти пучков, относительные высоты которых лежат в пределах от 0 до 1 (Рис. 2). Примеры: 1 0.866 0.707 или 1 0.707 0.7; или 1 0.8 0.7 0.5 0.25;

Передний отрезок – величина, определяющая положение поверхности предмета относительно ОС.

Для предмета ближнего типа задается расстояние в мм от первой поверхности системы до предмета в соответствии с правилом знаков. Значение «0» означает, что предмет совпадает с первой поверхностью ОС, а его величина есть расстояние от оси до точки предмета.

Для предмета дальнего типа передний отрезок задается в диоптриях, как величина, обратная расстоянию в (м) от полюса входного зрачка системы (для основного цвета параксиальной зоны) до предмета.

Примеры: 0 или -24.53

При необходимости допускается задание различных отрезков для различных точек предмета (в меню «параметры внеосевых пучков»). По умолчанию значение = 0.

Радиус поверхности предмета.

Для предмета ближнего типа значение радиуса равное 0 указывает, что поверхность предмета есть плоскость. Значение не равное нулю указывает, что предмет является сферой данного радиуса, при этом под величиной предмета понимается длина дуги от оси до точки предмета.

Для предмета дальнего типа значение радиуса поверхности предмета безразлично.

Пример: 1.E+3. Значение по умолчанию = 0.

Параметры изображения

Значение по умолчанию: ближнего типа.

Признак типа изображения:

- изображение ближнего типа означает изображение «на конечном расстоянии»;
- изображение дальнего типа означает изображение удаленного типа «на бесконечности».

Величина изображения.

Способ задания величины изображения не имеет особой специфики. При задании величины изображения работы анализ и оптимизация автоматически определяют величину предмета.

Положение изображения.

Может быть задано двумя способами:

- положение поверхности изображения либо в мм от последней поверхности системы, либо в дптр от выходного зрачка (для изображения дальнего типа) в соответствии с правилом знаков. Пример: -14.2.
- положение поверхности изображения задается как смещение относительно плоскости Гаусса либо в мм (изображение ближнего типа), либо в дптр (изображение дальнего типа). Пример: 0.01.

По умолчанию принимается, что поверхность изображения совпадает с плоскостью Гаусса.

Радиус поверхности изображения.

Для изображения ближнего типа значение радиуса равное 0 указывает, что поверхность изображения есть плоскость. Значение радиуса поверхности, не равное нулю указывает, что изображение является сферой данного радиуса, при этом под величиной изображения понимается длина дуги от оси до точки изображения.

Для изображения дальнего типа значение радиуса поверхности безразлично.

Параметры формы поверхностей

Входной язык обеспечивает задание плоских, сферических поверхностей, асферических поверхностей вращения второго и высшего порядков, а также конических, цилиндрических и торических поверхностей и голографических оптических элементов ГОЭ (киноформов).

Радиусы, кривизны поверхностей или углы нулевого луча (R, CR, AL).

Способ задания определяется меню «Настроить» – «Поверхность» (Рис. 3).

Радиусы поверхностей могут задаваться явно как элементы массивов R (радиусы) либо CR (кривизны) одним из следующих способов:

104.2 -600.3 -88 -104.2

0.00959 -0.0016658 -0.011363636 -0.009596928

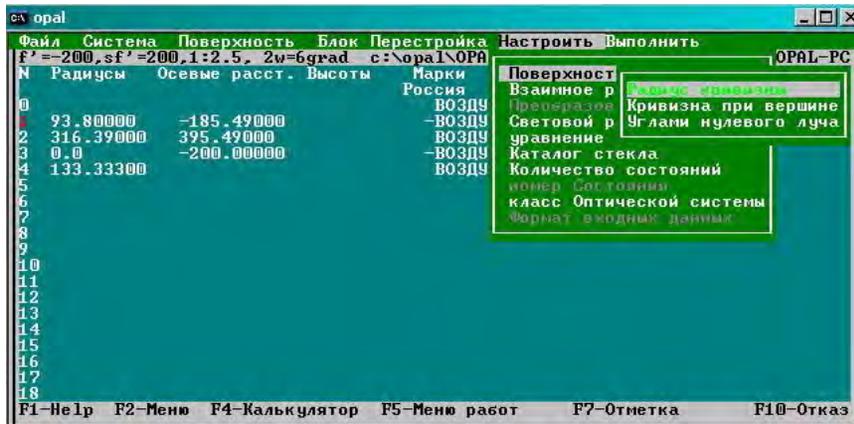


Рис. 3

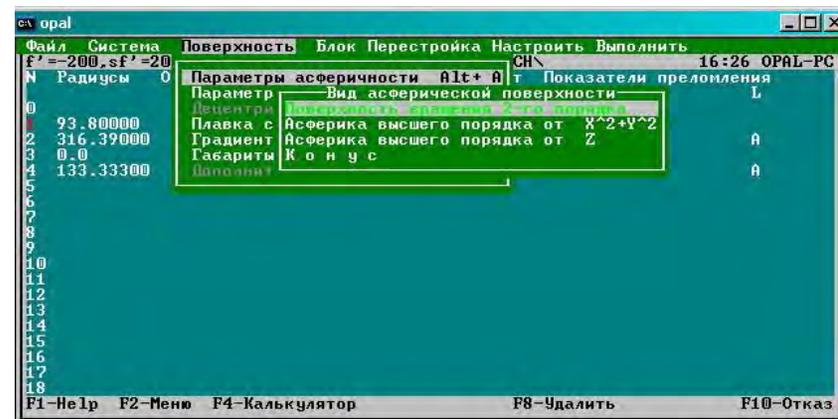


Рис. 4

Знак R зависит от ориентации поверхности:

$R > 0$, если поверхность направлена выпуклостью влево, $R < 0$, если поверхность направлена выпуклостью вправо, для плоских и planoидных поверхностей вместо $R = \text{«бесконечность»}$ условно принимается $R = 0$ ($CR = 0$).

Предусмотрено неявное задание формы поверхностей с помощью углов нулевых лучей (задание радиусов по альфам). Пример: 1 .14 0.27 0.14 0 9 (высота 30)

Задание несферических поверхностей

При описании несферических поверхностей различают (Рис.5):

- несферические поверхности вращения второго порядка
- несферические поверхности вращения высшего порядка
- цилиндрические поверхности с ориентацией по X и Y;
- торические поверхности с ориентацией по X и Y;
- конические поверхности.

Поверхностями вращения *второго порядка* являются поверхности задаваемые уравнением

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».

Цилиндрические поверхности допускаются двух ориентаций:

- образующая параллельна оси X,
- образующая параллельна оси Y.

Значение эксцентриситета задает форму направляющей кривой второго порядка; по умолчанию E2 равно нулю.

Торическая поверхность допускается задание двух ориентаций:

- ось вращения параллельна оси X,
- ось вращения параллельна оси Y.

Примечание: для центрированных систем задание цилиндров и торов не допустимо. Коническая поверхность: для задания поверхности указывается угол раствора конуса.

Параметры взаимного расположения поверхностей

Взаимное расположение поверхностей в оптической системе задается массивом осевых расстояний между вершинами поверхностей. Пример: -8 4.5 -12.73 -0.5

Положение апертурной диафрагмы задают с помощью двух параметров:

- количество поверхностей до диафрагмы по ходу луча
- расстояние до диафрагмы от предыдущей поверхности в соответствии с правилом знаков.

Произведение величины расстояние до диафрагмы на показатель преломления среды, в которой находится диафрагма, должно быть положительным. Расстояние до диафрагмы также не должно превышать по абсолютной величине расстояния между поверхностями, где размещается апертурная диафрагма.

Если расстояние до диафрагмы не равно нулю, то поверхность диафрагмы считается плоской. Если расстояние до диафрагмы = 0, то поверхность диафрагмы совпадает с соответствующей поверхностью в системе (т.е. координаты луча на диафрагме есть координаты луча на поверхности).

Значение ND=999 указывает, что в ОС задан входной зрачок; SD задает положение входного зрачка.

Если предмет дальнего типа, SD есть расстояние в мм от первой поверхности до зрачка.

Если предмет ближнего типа, SD задают в дптр от поверхности предмета до зрачка; в случае телецентрического хода лучей SD=0 дптр.

Значение по умолчанию: ND=0; SD=0

Габаритные данные

Задание габаритов апертурой и виньетированием.

Габариты осевого пучка определяются одним числом – передней центральной апертурой. Задание апертуры является обязательным. Величину апертуры осевого пучка задают значением передней (задней) апертуры, либо световым диаметром на АД.

При предмете дальнего типа передняя апертура задается как умноженная на показатель преломления высота в мм крайнего (апертурного) луча осевого пучка на входном зрачке. Аналогично в пространстве изображения. *При предмете ближнего типа* передняя апертура есть SIN угла, образуемого с осью крайним лучом осевого пучка, умноженный на показатель преломления в пространстве предметов для основной длины волны. При изображении ближнего типа задняя апертура – это умноженный на показатель преломления в пространстве изображений SIN угла, образуемого с осью ОС и лучом из центра изображения на край выходного зрачка.

Геометрическое виньетирование внеосевых пучков

Задается на АД; его величина показывает, какая часть пучка по отношению к половине диаметра диафрагмы срезается сверху и снизу. Сумма верхнего и нижнего виньетирования пучка не может быть больше 2.

Предусматриваются следующие способы задания виньетирования: виньетирование верхнее; виньетирование нижнее. Примеры: 0.3 0.3 0.4 0.2;

Задание световых габаритов поверхностей.

Габариты поверхностей задаются световыми высотами (половиной светового диаметра).

Примеры: 22 27.2 19.9 20 15 14.5

Задание параметров экранирования

Описанные данные служат входной информацией для определения реального экранирования пучков работами анализа и используются в основном для зеркально-линзовых оптических систем:

- экранирующая поверхность (NE),
- коэффициент экранирования (ЕК).

NE номер поверхности на которой, либо за которой расположен экран определяющий экранирование осевого пучка (ведущий экран). Если $NE > 0$, то данная поверхность определяет пучок при преломлении либо отражении на ней (в рабочем ходе). Если $NE < 0$, то данная поверхность экранирует пучки, когда она «загораживает» ход пучков (в нерабочем положении).

Например, в двузеркальной системе Кассегрена, если $NE=2$, то экранирующим является вторичное зеркало при отражении от него пучка предварительно отраженного от первичного зеркала, при этом на рабочей отражающей поверхности вторичного зеркала нанесена экранирующая неотражающая зона.

Если $NE=-2$, то вторичное зеркало экранирует пучки до падения их на первичное зеркало. Максимальное значение коэффициента относительного экранирования для осевого пучка на экране задается переменной ЕК .

Параметры спектрального интервала

Рабочие длины волн задаются в мкм. Задание длин волн обязательно. Примеры: 0.703 0.8

Первое значение определяет основной «цвет», остальные – дополнительный.

Возможно символьное задание значений для длин волн, имеющих стандартные обозначения:

i	0.365
h	0.4047
G'	0.43405
G	0.43583
F'	0.48
F	0.48613
e	0.54607
d	0.58756
D	0.5893
C'	0.6438
C	0.65628
г	0.70645
A'	0.76649

Относительная спектральная эффективность на рабочих длинах волн представляет собой весовые коэффициенты при расчете полихроматических характеристик. Примеры: 0.94 1 0.91. По умолчанию =1.

Параметры оптических сред

Задаются несколькими способами:

- марка стекла,
- показатель преломления стекла,
- кодами стекол

Знак, стоящий у марки, будет присвоен показателям преломления. Нумерация оптических сред начинается с нуля (0 – пространство предметов). Примеры: ВОЗДУХ – ВОЗДУХ - К8 К8 ВОЗДУХ

1 -1 -1.514092

1 -1 -305

Допускается задание оптических материалов с помощью номеров, присвоенных материалам при занесении их в машинный каталог. Примеры: 305 1401 1 606.

2. Оптимизация

Начало работы

После ввода конструктивных данных оптической системы, описания пространства предметов, изображений, спектрального диапазона, расчета параксиальных и абберационных характеристик можно приступить к процессу оптимизации оптической системы (Рис. 6).



Рис. 6

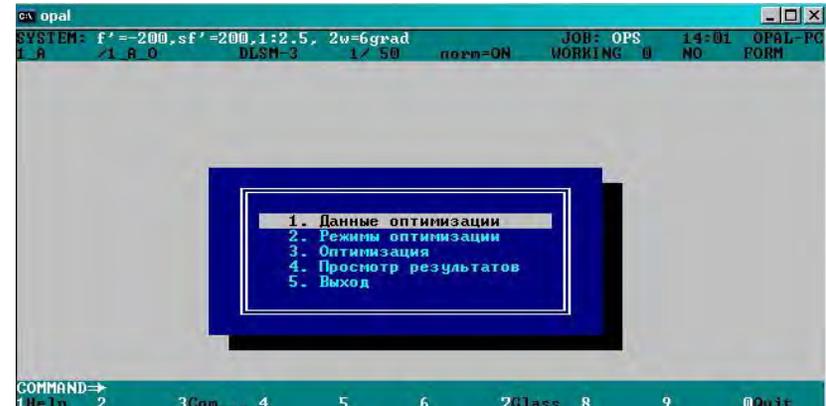


Рис. 7

«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. 8.

Описание параметров оптимизации (PAR) представляется списком:

$PAR(1-7) = D, C, SI, SD, -D/1, CA5, ES5$ или

$PAR(*) = D, C, SI, SD, -D1, CA5, ES5$.

Связь между параметрами (PARF, PARC, CC) устанавливается операторами:

$PARF(1-2) = C1-5, D1-4$;

$PARC(1-2) = C10-6, D9-6$;

$CC(1-2) = -1, 1$.

```

c:\opal
SYSTEM: f'=-200,sf'=200,1:2.5, 2w=6grad          JOB: OPS    14:01  OPAL-PC
C:\OPAL\FORM.OPS
? ----- SPACE ----- ?
PAR(*) = C;
EQF(*) = U1,U2;
MF(*) = DX,DY;
L:1  C:1
F1-Help  F4-Transl  F7-MarkLine  F8-SaveAs...  F9-CopyLine  F10-Quit

```

Рис. 8

Ограничения на значения параметров: кривизны $C < C >$; толщин $D < D >$; переднего отрезка $SO < SO >$; заднего отрезка или смещения $Sl < Sl >$; 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 $SECT=45$.

Пример. Описать ОС всеми кривизнами, толщинами и промежутками, кроме второго.

Имеем список: $PAR(1-3) = C, D, -D/2$.

Рассмотреть все поперечные aberrации осевого и двух сечений внеосевых пучков. Весовые коэффициенты для всех aberrаций устанавливаются равными 5:

$MF(1-8) = DYA, DYM, DYS, DXS, DYA!^*1, DYM!^{**}1^*, DYS!^{**}1, DXS!^{**}1$;

$MFW(1-4) = 5$.

Накладываются ограничения на осевые расстояния $D > (1,3-4) = 5, 10, 8, 12$; $D < (1, 3-4) = 1, 1, 0.5$.

Устанавливается требуемое значение обобщенного увеличения $EQF(1) = VGO$; $EQF\#(1) = - 4500$;

Определяется число лучей в осевом пучке и относительные координаты лучей $REYA = 2$; $PCA(1-2) = 1., 0.707$.

Марки параметров, характеристик и aberrаций

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 VO ;
- 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 аберраций (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	$DIS, DIS/*, DIS/B$
Дисторсия %	$DIS\%, DIS\%/*, DIS\%/B$
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. 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 >.

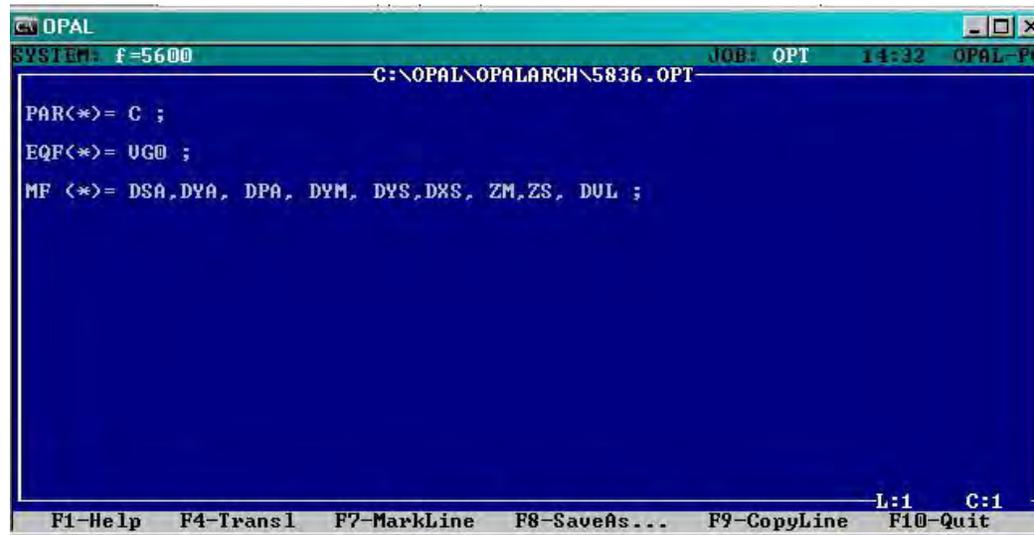


Рис. 9

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 эта функция не нулевая;
- отображение (рисунок) оптической схемы.

Переход обратно в текстовый режим производится клавишей $\langle F6 \rangle$.

Завершение оптимизации. При необходимости завершить оптимизацию во время выполнения анализа влияния параметров следует нажать клавиши $\langle ESC \rangle$ или $\langle F10 \rangle$. После этого появится меню, которое будет содержать запрос о подтверждении окончания процесса. Если клавиша $\langle ESC \rangle$ была нажата случайно, то от завершения можно отказаться, выбрав соответствующий пункт меню.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

Планы практических занятий

Тема 1. Основные положения и законы распространения света; их техническое применение. Оптические материалы.

1.1. Дисперсионные характеристики оптических материалов. Правило знаков. Задачи на отражение и преломление света.

1.2. Расчет оптических пластин и клиньев.

1.3. Расчет отражательных и разделительных призм, построение развертки.

Тема 2. Теория идеальной оптической системы.

2.1. Графический метод построения изображений.

2.2. Определение положения и величины изображения в идеальной оптической системе.

2.3. Расчет кардинальных элементов ОС

Тема 3. Оптика нулевых и параксиальных лучей.

3.1. Расчет хода нулевых лучей в системе, состоящей из тонких компонентов в однородной среде.

3.2. Расчет хода нулевых лучей в «толстой» линзе в неоднородной среде.

3.3. Расчет сферических зеркал.

Тема 4. Ограничение световых пучков в оптических системах.

4.1. Определение положений и размеров зрачков и диафрагм в оптических системах.

4.2. Расчет геометрического виньетирования.

Тема 5. Оптическая система как передатчик лучистой энергии.

5.1. Решение задач по светотехнике

5.2. Расчет коэффициента светопропускания в оптических системах. Расчет освещенности изображения.

Тема 6. Аберрации оптических систем.

6.1. Расчет аберраций оптических деталей: линз, зеркал, плоскопараллельных пластинок.

6.2. Суммирование аберраций.

6.3. Расчет аберраций III порядка по суммам Зейделя.

6.4. Расчет апланатических линз.

Тема 7. Типовые оптические системы.

7.1. Габаритный расчет телескопических систем Кеплера

- 7.2. Габаритный расчет телескопических систем Галилея.
- 7.3 Расчет коллектива, как элемента, сопрягающего зрачки. Оборачивающие системы.
- 7.4. Геометрический расчет микроскопа и лупы
- 7.5. Геометрический расчет микроскопа. Подбор объективов и окуляров по каталогу.
- 7.6. Габаритный расчет оптических систем оптико-электронных приборов и лазеров.
- 7.7. Расчет глубины резкости и разрешающей способности фотообъектива
- 7.8. Расчет конденсора на минимум сферической аберрации. Расчет проекционных установок

Тема 8. Элементы теории образования изображений. Компьютерное моделирование.

- 8.1. Расчет разрешающей способности визуальных оптических систем.

Требования к выполнению домашних заданий и контрольных работ

Задачи, предлагаемые для самостоятельного решения, требуют определенной теоретической подготовки.

При выполнении требуется:

1. Записать краткое условие задачи с условными обозначениями согласно ГОСТу.
2. Рабочий чертеж, оптические схемы и выполнить необходимые построения.
3. Подробное аналитическое решение.
4. Расчет, при необходимости выполненный с помощью микрокалькулятора.
5. Оптическая схема в масштабе.

При последовательном расчете пункты 3 и 4 совмещаются.

4 задачи – 1 час.

Контрольная задача – 20÷30 мин.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Тема 1. Основные положения и законы распространения света; их техническое применение. Оптические материалы

Задача 1.1

Плоская стеклянная пластина ($n=1,5$) рассматривается в микроскоп. Сначала микроскоп устанавливают для наблюдения верхней поверхности пластинки, а затем смещают тубус микроскопа до тех пор, пока не будет отчетливо видна нижняя поверхность пластинки. (Для удобства наблюдения на поверхностях пластинки сделаны метки). Смещение тубуса 2 мм. Найти толщину пластинки a .

Решение:

Удлинение в пластине $\Delta = d(n-1)/n$. Она равна смещению тубуса 2 мм.

$$d = \Delta n / (n-1) = 6 \text{ мм.}$$

Ответ: 6 мм.

Задача 1.2

Показатель преломления алмаза $n=2,417$. Определить предельный угол полного внутреннего отражения на границе алмаза с воздухом.

Решение:

При переходе луча из более плотной среды в менее плотную преломленный луч отклоняется от нормали, т.е. $\epsilon' > \epsilon$. При увеличении угла падения наступит момент, когда $\sin \epsilon' = 1$, т.е. преломленный луч будет скользить по поверхности границы раздела ($\epsilon' = 90^\circ$). В этом случае предельный угол падения ϵ_m определяется по формуле с учетом преломления луча из среды в воздух

$$\sin \epsilon_m = \frac{1}{n} = \frac{1}{2,417} = 0,413736, \quad \epsilon_m = 27,155^\circ.$$

Ответ: $\epsilon_m = 27,155^\circ$.

Тема 2. Теория идеальной оптической системы

Задача 2.1

Определить положение и размер фотографируемого в воде предмета относительно тонкого фотообъектива с $f = 50$ мм, если изображение размером 20 мм находится за объективом на расстоянии $a = 51,2$ мм. Какое расстояние необходимо установить по шкале дистанции?

Решение:

Формула отрезков $\frac{n'}{a'} - \frac{n}{a} = \frac{n'}{f'}$, из которой определяем расстояние до предмета. Имеем $\frac{1}{51,2} - \frac{1,33}{a} = \frac{1}{50}$, далее $a = -2837,3$ мм. $-\frac{y'}{y} = \frac{na'}{n'a}$; $y = -\frac{1,33 \cdot 51,2}{1 \cdot (-2837,3)} = 833,3$.

Отрезок $z' = 1,2$; Линейное увеличение $\beta = -\frac{z'}{f'} = -0,024^*$. Величина изображения $y' = y \cdot \beta$; $y = \frac{y'}{\beta}$. Расстояние по шкале дистанции $a_{\text{вк}} = \frac{a'}{\beta} = -2133,33$ мм.

Ответ: $a = -2837,3$ мм. $a_{\text{вк}} = -2133,33$ мм.

Задача 2.2

Предмет размером 24 мм проецируется объективом увеличителя с негатива на фотобумагу в изображение размером 120 мм. Плоскость фотобумаги удалена от плоскости негатива на расстояние $L = 370$ мм. Определить фокусное расстояние объектива, если расстояние между главными плоскостями равно $\Delta_{\text{нн}} = 10$ мм. Какова будет погрешность в определении фокусного расстояния, если объектив считать тонким?

Решение:

Линейное увеличение $\beta_{\text{об}} = -y'/y = -120/24 = -5^*$. Другая формула $\beta_{\text{об}} = a'/a$.

Для толстого компонента: Размер L : $a' - a + \Delta_{\text{нн}} = L$.

Если $a' = \beta_{\text{об}} \cdot a$, то $\beta_{\text{об}} \cdot a - a + \Delta_{\text{нн}} = L$, тогда $-5a - a + 10 = 370$ (мм). Далее $-6a = 360$, $a = -60$ мм.

$a' = L + a - \Delta_{\text{нн}} = 370 - 70 = 300$ мм

Фокусное расстояние $f_{\text{об}}' = a' / (1 - \beta_{\text{об}}) = 300 / 6 = 50$ (мм).

При $\Delta_{\text{нн}} = 0$ (тонкий объектив): $L = a' - a$.

Отрезок $a' = \beta_{\text{об}} \cdot a$.

Имеем $-6a = 370$, $a = -61,7$ мм. $a' = L + a = 370 - 61,7 = 308,3$ (мм).

Фокусное расстояние $f_{об2}' = a' / (1 - \beta_{об}) = 308,3 / 6 = 51,39$ (мм).

Погрешность $\Delta f' = f_{об2}' - f_{об1}' = 1,39$ мм.

Ответ: $f' = 50$ мм, если $\Delta_{HH'} = 0$, то $f' = 51,39$ мм; а $\Delta f' = 1,39$ мм.

Задача 2.3

Двухзеркальная телескопическая система образована собирающими зеркалами с $r_1 = -200$ мм, $r_2 = 40$ мм. Определить, на сколько и в какую сторону необходимо сместить второе зеркало, чтобы изображение бесконечно удалённой осевой точки совпадало бы с вершиной первого зеркала.

Решение:

Для всей ОС оптическая сила $\frac{1}{f'} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$.

Фокусные расстояния компонентов $f_1 = \frac{-r_1}{2}$, $f_2 = \frac{-r_2}{2}$; задний отрезок $a_F' = f' \left(1 - \frac{d}{f_1}\right)$; составим уравнение

для величины воздушного промежутка: $\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} = \frac{1 - \frac{d}{f_1}}{d}$, тогда $\frac{1}{d} - \frac{1}{f_1} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$ и $\frac{1}{d} + \frac{d}{f_1 f_2} = \frac{2}{f_1} + \frac{1}{f_2}$.

Имеем $\frac{f_1 f_2 + d^2}{d f_1 f_2} = \frac{2}{f_1} + \frac{1}{f_2}$, далее $d^2 - d(f_1 f_2) \left[\frac{2}{f_1} + \frac{1}{f_2} \right] + f_1 f_2 = 0$; $d^2 - d(2f_1 + f_2) + f_1 f_2 = 0$ и $d^2 - 60d - 2000 = 0$, от-

куда $d = 30 \pm \sqrt{30^2 + 2000}$ и численно $d = 30 \pm 53,85$, т.к. толщины всегда считаются положительными $d = 83,85$ мм.

В первоначальном случае $d = f_1 + f_2 = \frac{-r_1}{2} + \frac{-r_2}{2} = 80$ мм, тогда смещение $83,85 - 80 = 3,85$ мм.

Ответ: 3,85 мм влево.

Тема 3. Оптика нулевых и параксиальных лучей

Задача 3.1

Линза имеет следующие конструктивные элементы: $r_1 = 100$, $r_2 = 282,94$ $d = 10$, стекло $K8(\lambda_e)$. Определить ее переднее и заднее фокусные расстояния, когда первая среда – воздух, а последняя среда: а) воздух; б) вода (λ_e); в) иммерсионное масло (λ_e). Воспользовавшись формулами для расчета параксиального луча, объясните обнаруженную закономерность.

Решение:

Расчет нулевого луча, полученные величины в мм.

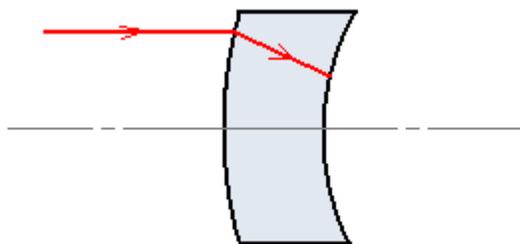
$$\alpha_1 = 0;$$

$$1. \alpha_2 = 0,3421; \quad h_1 = 100; \quad f' = 292,94; \quad \frac{h'}{h} = -\frac{f'}{f}$$

$$\alpha_3 = 0,3421; \quad h_2 = 96,58; \quad f = -292,94; \quad \frac{h'}{h} = -\frac{f'}{f}$$

$$2. f' = 292,94; \quad f = -219,76;$$

$$3. f' = 292,94; \quad f = -193,36.$$



$$r_1 = 100;$$

$$r_2 = -282,94;$$

$$d = 10;$$

$$n_1 = 1;$$

$$n_2 = 1,5183;$$

$$n_3 = 1; 1,33; 1,515.$$

Формула для параксиального луча: $\frac{h'}{S'} - \frac{h}{S} = \frac{n' - n}{r}$

Предмет на бесконечности $S_1 = \infty; \frac{h'_1}{S'_1} = \frac{h'_1 - h_1}{r_1}; \frac{S'_1}{h'_1} = \frac{r_1}{1,5183 - 1}; S'_1 = \frac{100 \cdot 1,5183}{0,5183} = 292,94;$

$S_2 = 282,94$ - предмет в центре второй поверхности $\frac{1}{S'_2} - \frac{1,5183}{282,94} = \frac{1 - 1,5183}{282,94} \Rightarrow S'_2 = 282,94; S'_F = 282,94.$

Доказательство основано на формулах: $S'_F = f' \left(1 - \frac{n-1}{n} \cdot \frac{d}{r_1}\right) \quad f' = S'_F + S'_H$

$$1. \frac{1}{S'_2} = \frac{1}{282,94} \quad 2. \frac{1,33}{S'_2} = \frac{1,33 - 1,5183 + 1,5183}{282,94}; S'_2 = 282,94. \quad 3. \frac{1,515}{S'_2} = \frac{1,515}{282,94}; S'_2 = 282,94.$$

Ответ: $f' = 292,94$ мм; $f = -193,36$ мм.

Тема 4. Ограничение световых пучков в оптических системах

Задача 4.1

Телеобъектив состоит из двух тонких компонентов, расположенных на расстоянии $d = 90$ мм. Первый компонент имеет фокусное расстояние $f_1' = 150$ мм, второй – отрицательный $f_2' = -75$ мм. Апертурная диафрагма расположена между компонентами на расстоянии 60 мм от первого компонента. Найти угловое поле телеобъектива в пространстве предметов и изображений, если полевая диафрагма диаметром $D_{n.d.} = 40$ мм установлена в задней фокальной плоскости объектива. $f_1' = 150$, $f_2' = -75$, $f' = 750$.

Решение:

Расчет линейного увеличения в зрачках.

$$t_1' = 60 \quad t_2 = -30 \quad t_2' = -21.43 \quad t_1 = 100 \quad \beta_p = 0.4286$$

Расчет положения заднего эквивалентного фокуса

$$d_F' = f' \cdot (1 - \Phi_1 \cdot d) = 300$$

Расчет углового увеличения и угла поля зрения в пространстве предметов

$$tg\omega' = \frac{D_{n.d.}}{d_F' - t_2'} = \frac{20}{321.43} = 0.0622$$

$$\frac{tg\omega'}{tg\omega} = \frac{1}{\beta_{p1}} = \gamma_{p1} = 2.333 \quad tg\omega = 0,02667$$

Ответ: $tg\omega = 0.02667$

Задача 4.2

В реверсивном телеобъективе с фокусным расстоянием $f' = 20$ мм полевая диафрагма, установленная в задней фокальной плоскости, должна быть расположена на расстоянии $a_F' = 60$ мм от задней главной точки второго компонента. Расстояние между компонентами $d = 80$ мм. Определить фокусные расстояния первого и второго компонентов объектива и его угловое поле в пространстве предметов и изображений, если диаметр полевой диафрагмы $D_{пд} = 30$ мм. Найти относительное отверстие реверсивного телеобъектива, если апертурной диафрагмой объектива является оправа второго компонента, диаметром 40 мм.

Решение:

Положение изображения в телеобъективе относительно 2-го компонента: $a_F' = (1 - d/f_1') f' = 60$ мм.

Зная $f' = 20$ мм, $d = 80$ мм, определяем для первого компонента $f_1' = -40$ мм.

Из формулы $f' = f_1' \cdot f_2' / (f_1' + f_2' - d)$ определяем для второго компонента $f_2' = 40$ мм.

Расчет углового поля зрения в пространстве изображения:

$$\operatorname{tg} w' = D_{\text{пд}} / 2a'_{\text{F}} = 15/60 = 0,25, \quad w' = 14^\circ, \quad 2w' = 28^\circ$$

Расчет положения выходного зрачка относительно F_1' : $z_1' = 120$ мм, линейное увеличение в зрачках

$$\beta_{\rho 1} = -z_1' / f_1' = 3^{\times} = D_{\text{Ад}} / D.$$

Расчет диаметра входного зрачка $D = 13,33$ мм.

Расчет относительного отверстия объектива $D/f' = 1/1,5$.

Расчет углового поля зрения в пространстве предметов:

угловое увеличение в зрачках $\gamma_{\rho 1} = \operatorname{tg} w' / \operatorname{tg} w$ или $\gamma_{\rho 1} = 1 / \beta_{\rho 1}$; тогда $\operatorname{tg} w' = 0,25$, имеем $\operatorname{tg} w = 0,25 \beta_{\rho 1} = 0,75$; $w = 37^\circ$

Ответ: $f_1' = -40$ мм; $f_2' = 40$; $2w' = 28^\circ$; $D/f' = 1/1,5$; $w = 37^\circ$

Задача 4.3

Двухзеркальный объектив типа объектив Кассегрена имеет следующие конструктивные параметры: $r_1 = -300$ мм; $r_2 = -150$ мм; $d = -90$ мм. Апертурной диафрагмой объектива является оправа второго выпуклого зеркала. Найти диаметр этой оправы, если относительное отверстие зеркального объектива $D/f = 1:2$. Найти световой диаметр первого компонента.

Решение:

Эквивалентное фокусное расстояние объектива:

$$f' = \frac{r_1 \cdot r_2}{2(r_1 - r_2 - 2d)} = \frac{300 \cdot 150}{2(-300 + 330)} = 750 \text{ мм.}$$

Диаметр входного зрачка объектива: $D = 375$ мм (относительное отверстие 1:2).

Линейное увеличение в зрачках:

$$\beta_{\rho 1} = \frac{D_{\text{Ад}}}{D} = \frac{r_1 s_1'}{r_1' s_1} = 0,4$$

Далее определяем положение зрачков:

из инварианта Аббе для первой зеркальной поверхности

$$\frac{1}{s_1'} + \frac{1}{s_1} = \frac{2}{r_1} \quad s_1' = -90 \text{ мм}; \quad s_1 = \frac{r_1 s_1'}{2s_1' - r_1} = \frac{-300(-90)}{-180 + 300} = 225 \text{ мм.}$$

Определяем световой диаметр первого компонента $D_{\text{св } \emptyset 1}$:

Известно, что $D_{\text{АД}}=150$ мм, а диаметр входного зрачка $D=375$ мм.

Зная поправку $\Delta D=S_1 \operatorname{tg} \omega=7$ мм, определяем $D_{\text{св } \emptyset 1}=D+2\Delta D=375+15,6=390,6$ мм.

Ответ: $D_{\text{св } \emptyset 1}=390,6$ мм

Задача 4.4

Объектив дуплета Пецваля состоит из двух тонких компонентов, расположенных на расстоянии $d=80$ мм. Фокусное расстояние первого компонента $f_1'=120$ мм, второго компонента - $f_2'=100$ мм. АД объектива является оправа первого компонента. Найти диаметр этой оправы, если относительное отверстие объектива $D/f'=0.5$. Определить диаметр второго компонента, если коэффициент виньетирования наклонного пучка для края поля $k_\omega=0.8$. Виньетирование несимметрично относительно главного луча. Угловое поле в пространстве предмета $2\omega=15^\circ$.

Решение:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 a$$

$$\frac{1}{f'_{\text{об}}} = \frac{1}{f_1'} + \frac{1}{f_2'} - \frac{d}{f_1' f_2'} = \frac{1}{120} + \frac{1}{100} - \frac{80}{120 \cdot 100} = \frac{100 + 120 - 80}{120 \cdot 100} = \frac{140}{120 \cdot 100} = 0.1167 \rightarrow f'_{\text{об}} = 85.7$$

$$\frac{D_{\text{вх.зр}}}{f'_{\text{об}}} = 0.5 \rightarrow D_{\text{вх.зр}} = 0,5 f'_{\text{об}} = D_{\text{комп}} = 0.5 \cdot 85.7 = 42.86 \text{ мм}$$

Определим выходной зрачок как изображение АД во втором компоненте.

Для второго компонента: $\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'}$

$$\frac{1}{a'} = \frac{1}{f'} + \frac{1}{a} \rightarrow a' = \frac{af'}{f' + a} = \frac{-80 \cdot 100}{-80 + 100} = -400$$

Линейное увеличение второго компонента:

$$\beta = \frac{a'}{a} = \frac{-400}{-80} = 5$$

Диаметр выходного зрачка:

$$D_{\text{вых.зр}} = 5 \cdot 42.86 = 214.3 \text{ мм}$$

Угловое поле в пространстве изображений:

$$tg\omega' = \frac{1}{\beta_{зр}} tg\omega = \frac{1}{D_{вых} / D_{вх}} tg7.5^{\circ} = \frac{42.86}{214.3} tg7.5^{\circ} \Rightarrow 2\omega' = 3.0^{\circ}$$

$$\frac{tg\sigma'}{tg\sigma} = \frac{1}{\beta} = 0.2$$

$$tg\sigma = \frac{tg\sigma'}{0.2} = \frac{tg1.5^{\circ}}{0.2} = 0.131$$

$$x = a' tg\sigma = -400 \cdot 0.131 = 52.37$$

$$D_{2компл} = D_{вых.зр} - 2x = 214.3 - 2 \cdot 52.37 = 109.56 \text{ мм}$$

Ответ: $D_{2компл} = 109,56 \text{ мм.}$

Тема 5. Оптическая система как передатчик лучистой энергии

Задача 5.1

Максимальная сила света папиросы $I_{\nu} = 2.5 \cdot 10^{-3}$ кд. Определить наибольшее расстояние, с которого можно заметить ночью огонёк папиросы, если минимальный световой поток, регистрируемый глазом $\Phi_{\nu} = 10^{-13}$ лм, а диаметр зрачка глаза ночью $D_{г.л} = 8$ мм. Поглощением света в атмосфере пренебречь.

Решение:

$$E_{\nu} = \frac{\Phi_{\nu}}{Q}$$

Так как $Q = \frac{\pi D^2}{4}$, то

$$E_{\nu} = \frac{4\Phi_{\nu}}{\pi D^2} \quad E_{\nu} = \frac{I_{\nu}}{r^2}$$

$$r^2 = \frac{I_{\nu}}{E_{\nu}} = \frac{I_{\nu} \pi D^2}{4\Phi_{\nu}} = \frac{2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 3,14 \cdot 64 \cdot 10^{-6}}{10^{-13} \cdot 4} = 125,6 \cdot 10^4 \text{ м}$$

$$r = 1120,7 \text{ м}$$

Ответ: $r = 1120,7 \text{ м.}$

Задача 5.2.

Фотоэлемент с диаметром светочувствительной поверхности $d_{np} = 20\text{мм}$ расположен от источника на расстоянии $r = 0,6\text{м}$. Определить силу света источника, при которой на фотоэлемент упадет световой поток $\Phi_v = 0,087\text{лм}$. Угол падения лучей на поверхность фотоэлемента $\varepsilon = 0$.

Решение:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0.02}{4} = 0.0001\pi \text{ (м}^2\text{)};$$

$$A = \omega r^2 \rightarrow \omega = \frac{A}{r^2} = \frac{0.0001\pi}{0.6^2} = 0.000278\pi \text{ (ср)};$$

$$I_v = \frac{\Phi}{\omega} = \frac{0.087}{0.000278} = 100 \text{ (кд)}.$$

Ответ: $I_v = 100\text{кд}$.

Задача 5.3

Солнце имеет угловой размер $2\omega = 0.009$ и создает на поверхности Земли освещенность $E_v = 10^5\text{лк}$. Определить освещенность Солнца, создаваемая оптической системой с $f' = 100\text{мм}$, диаметром входного зрачка $D = 50\text{мм}$ и $\tau_a = 0.8$. Найти световой поток, поступающий на площадку приемника $d_{np} = 0.5\text{мм}$, расположенную в плоскости изображения Солнца.

Решение:

$$L_v = \frac{E_v}{\pi \sin^2 \omega} = \frac{10^5}{3.14 \cdot 0.045^2} = 1.57 \cdot 10^9 \left(\frac{\text{кд}}{\text{м}^2} \right);$$

$$E_v' = \frac{0.8 \cdot 3.14 \cdot 1.57 \cdot 10^9}{4} \cdot \left(\frac{1}{2} \right)^2 = 2.46 \cdot 10^9 \text{ (лк)};$$

$$2y' = 2\omega f' = 0.009 \cdot 100 = 0.9\text{мм};$$

$$\Phi_v' = E_v' \cdot \frac{\pi \cdot d_{np}^2}{4} = 2.46 \cdot 10^9 \cdot \frac{3.14 \cdot 0.5^2}{4} \cdot 10^{-6} = 48.3 \text{ (лм)}.$$

Ответ: $E_v' = 2.46 \cdot 10^9\text{лк}$, $\Phi_v' = 48.3\text{лм}$.

Задача 5.4

Широкоугольный фотографический объектив с угловым полем в пространстве предметов $2\omega = 80^\circ$ регистрирует объекты на фоне дневных облаков яркостью $L_v = 10^4 \text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$. Коэффициент пропускания объектива $\tau_{o.c} = 0,8$. Найти относительное отверстие объектива, если при коэффициенте пропускания атмосферы $\tau_a = 0,6$ освещать изображения облаков в центре поля $E'_v = 420 \text{лк}$. Определить коэффициент виньетирования наклонных пучков, если при линейном увеличении в зрачках $\beta_p = 1,2$ освещать изображения облаков на краю поля составляет $E'_{v,\omega} = 113 \text{лк}$.

Решение:

$$E'_{v,\omega} = E'_v k_\omega \cos^4 \omega'$$

$$E'_v = \frac{\tau \pi L_v}{4} \left(\frac{D}{f'} \right)^2$$

$$\frac{D}{f'} = \sqrt{\frac{E'_v \cdot 4}{\tau \pi L_v}} = \sqrt{\frac{420 \cdot 4}{0,75 \cdot 3,14 \cdot 10^7}} = 0,267$$

$$\text{tg} \omega' = \frac{\text{tg} \omega}{\beta_p} = \frac{\text{tg} 40^\circ}{1,2} \Rightarrow \omega' = 35^\circ$$

$$k_\omega = \frac{E'_{v,\omega}}{E'_v \cos^4 \omega'} = \frac{113}{420 \cdot \cos^4 35^\circ} = 0,6$$

Ответ: $k_\omega = 0,6$

Тема 6. Аберрации оптических систем

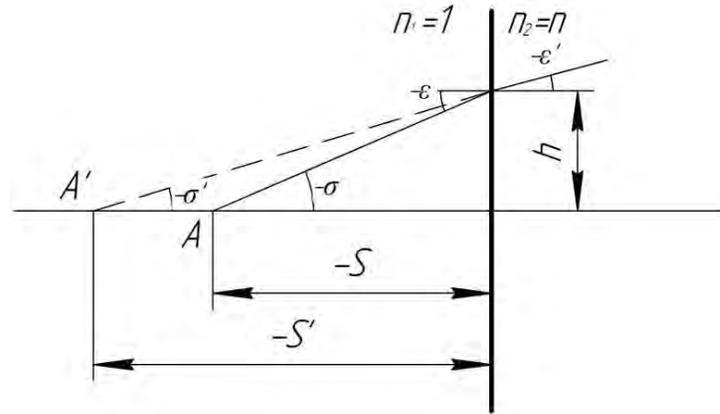
Задача 6.1

При каком условии продольная и поперечная сферическая аберрация совпадают по величине? Определить численно это условие для плоских границ воздух-вода, воздух-стекло ТФ5. Показатель преломления воды ($t^\circ = 20^\circ \text{C}$) $n = 1,33$. Расстояние от границы раздела до точки предмета $S = 100 \text{мм}$.

Решение:

Положение изображения A' относительно границы раздела двух сред определяется формулой

$$S' = \frac{h}{\operatorname{tg} \sigma'}$$



Учитывая выражения $h = S \operatorname{tg} \sigma' = S \operatorname{tg} \varepsilon$ и $n \sin \varepsilon' = \sin \varepsilon$, имеем $S' = \frac{S \operatorname{tg} \varepsilon}{\operatorname{tg} \varepsilon'} = S n \frac{\cos \varepsilon'}{\cos \varepsilon}$.

Из формулы инвариант Аббе для параксиальных лучей при $r = \infty$, имеем $S'_0 = n S_0$, причём $S_0 = S$.

Определим продольную сферическую aberrацию, как

$$\Delta S' = S' - S'_0 = S \left(\frac{\operatorname{tg} \varepsilon}{\operatorname{tg} \varepsilon'} - n \right) = n S \left(\frac{\cos \varepsilon'}{\cos \varepsilon} - 1 \right),$$

а поперечная сферическая aberrация

$$\delta g' = \Delta S' \cdot \operatorname{tg} \sigma' = \Delta S' \operatorname{tg} \varepsilon' = n S \left(\frac{\cos \varepsilon'}{\cos \varepsilon} - 1 \right) \operatorname{tg} \varepsilon'.$$

Величины продольной и поперечной aberrации равны при условии $\delta g' = \Delta S'$, когда $\operatorname{tg} \sigma' = 1$ или $\sin \sigma' = \cos \sigma' = 0,7071$. При этом имеем $\sin \sigma = \sin \varepsilon = n \cdot 0,7071$. Угол падения $\varepsilon = \sigma = \arcsin(0,7071 \cdot n)$. Для воды $\sigma = \varepsilon = 70^\circ 30'$, для стекла ГФ5 ($n=1,755$), $\sigma = \varepsilon = \arcsin(> 1)$, что невыполнимо.

Необходимо выполнить условие $0,7071 n \leq 1$, откуда $n \leq 1,4142$.

Ответ: выполнить условие $0,7071 n \leq 1$

Тема 7. Типовые оптические системы

Задача 7.1

Выполнить габаритный расчёт зрительной трубы, если точность визирования должна составлять 0,3.

Решение:

Точность визирования выражается формулой $\varphi = \rho''/D$, где ρ'' -величина, зависящая от формы визирной обработки, формы сетки и условий наблюдения.

При нормальных внешних условиях при наблюдении на марку с помощью биссектора $\rho''=20$. При этом диаметр выходного зрачка зрительной трубы составляет 1-2 мм. Примем $D'=1.5$ мм. Диаметр входного зрачка

$$D = \rho''/\varphi''=67\text{мм}$$

Видимое увеличение зрительной трубы

$$\Gamma_T = -\frac{f'_1}{f'_2} = -\frac{D}{D'} = -45^x$$

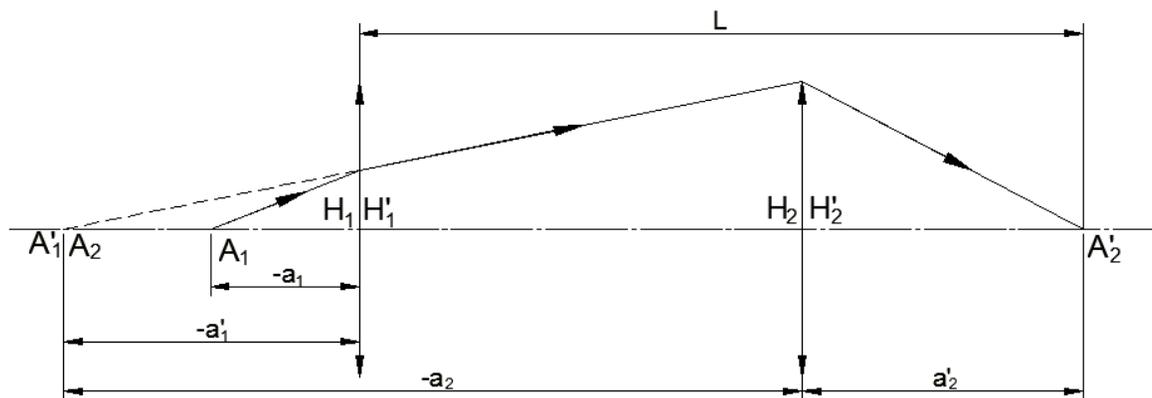
Полагая фокусное расстояние окуляра равным $f'_2=10$ мм, фокусное расстояние объектива $f_1 = -f_2 * \Gamma = 450$ мм. Относительное отверстие объектива:

$$\frac{D}{f'_1} = \frac{67}{450} = 1:6,7$$

$$\text{Ответ : } D=67\text{мм}, \Gamma_T=-45^x, f_1 = 450 \text{ мм}, \frac{D}{f'_1} = 1:6,7$$

Задача 7.2

В зрительной трубе с внутренней фокусировкой фокусное расстояние объектива $f = 150$ мм, расстояние между первым компонентом и плоскостью сетки $L = 195$ мм. Фокусировка осуществляется положительным компонентом, расстояние между вторым компонентом и плоскостью сетки при фокусировке трубы на бесконечность $a'_f = a'_2 = 15$ мм. Определить фокусные расстояния компонентов и расстояние между ними при фокусировке трубы на бесконечность и на минимальное расстояние.



Решение:

Длина объектива $L = d_0 + a'_f$ откуда $d_0 = L - a'_f = 195 - 15 = 180$ мм.

Из формулы

$$a'_f = f' \cdot \left(1 - \frac{d_0}{f'_1}\right)$$

находим

$$f'_1 = \frac{f' \cdot d_0}{f' - a'_f} = \frac{180 \cdot 150}{150 - 15} = 200 \text{ мм.}$$

Из формулы для фокусного расстояния двухкомпонентной системы

$$f' = \frac{f'_1 \cdot f'_2}{f'_1 + f'_2 - d_0} \quad \text{находим}$$

$$f'_2 = \frac{f'_1 - d_0}{f'_1 - f'} \cdot f' = \frac{200 - 180}{200 - 150} \cdot 150 = 60 \text{ мм.}$$

При линейном увеличении второго компонента $\beta_2 = -1$, имеем

$$a'_2 = 2f'_2, a_2 = -a'_2 = -120 \text{ мм.}$$

Тогда

$$d_s = L - a'_2 = 195 - 120 = 75 \text{ мм}$$

$$a'_1 = d_s - a_2 = 75 - 120 = -45 \text{ мм.}$$

Ответ: $f'_1 = 200$ мм, $f'_2 = 60$ мм, $a'_1 = -45$ мм, $a'_2 = -120$ мм.

Задача 7.3

Для наблюдения объекта используется лупа с $f' = 25$ мм. Найти видимое увеличение лупы в случаях, когда зрачок глаза расположен а) в задней фокальной плоскости, б) вблизи лупы.

Решение:

а) когда зрачок глаза расположен в задней фокальной плоскости, то видимое увеличение лупы находится по формуле

$$\Gamma_n = 250 / f' = 250 / 25 = 10^x$$

б) Если зрачок находится вблизи лупы, формула примет вид

$$\Gamma_n = 250 / f' + 1 = 11^x$$

Ответ: а) $\Gamma_n = 10^x$, б) $\Gamma_n = 11^x$

Задача 7.4

Микроскоп снабжён объективом с линейным увеличением $\beta_{об} = -40^x$ и окуляром с $f' = 25$ мм. При какой длине волны света λ возможно раздельное наблюдение двух точек, находящихся на расстоянии $\delta = 0,0005$ мм, если диаметр выходного зрачка микроскопа $D = 0,8$ мм?

Решение

Линейная разрешающая способность микроскопа: $\delta = \lambda / (2 \cdot A)$, отсюда длина волны $\lambda = 2 \cdot \delta \cdot A$.

Диаметр выходного зрачка $D' = -500 \cdot A / \Gamma_m$, тогда величина передней числовой апертуры $A = -D' \cdot \Gamma_m / 500$.

Видимое увеличение микроскопа $\Gamma_m = \beta_{об} \cdot \Gamma_{ок}$, зная видимое увеличение окуляра $\Gamma_{ок} = 250 / f'_{ок}$, имеем

$$\Gamma_m = 250 \cdot \beta_{об} / f'_{ок}$$

Расчет длины волны: $\lambda = -2 \delta D' \Gamma_m / 500 = -2 \cdot \delta D' \beta_{об} 250 / (500 f'_{ок}) = -\delta \cdot D' \beta_{об} / f'_{ок} = -0,0005 \cdot 0,8 \cdot (-40) / 25 = 0,00064$ мм.

Ответ: $\lambda = 0,00064$ мм.

Задача 7.5

В микроскопе используется окуляр с увеличением $\Gamma_{ок} = 10^x$ и угловым полем $2\omega' = 30^\circ$. Определить увеличение микроскопа и линейное поле при работе с объективами $10 \times 0.30; 40 \times 0.65$;

Дано: $\bar{\Gamma}_{ок} = 10^x; 2\omega' = 30^\circ; 1) \beta_{об} = 10; A = 0.30; 2) \beta_{об} = 40; A = 0.65$.

Найти: 1) $2y, \bar{\Gamma}_m$? 2) $2y, \bar{\Gamma}_m$?

Решение:

Из формулы видимого увеличения микроскопа $\Gamma_M = \beta_{об} \cdot \Gamma_{ок}$ определяем Γ_M :

$$1) 10 \cdot 10^x = 100^x$$

$$2) 40 \cdot 10^x = 400^x$$

Далее находим линейное поле зрения микроскопа

$$2y = \frac{D_{пд}}{\beta_{об}} = \frac{500 \cdot tg \omega'}{\beta_{об} \bar{\Gamma}_{ок}} = \frac{500 \cdot tg \omega'}{\bar{\Gamma}_M}$$

$$1) 2y = \frac{500 \cdot tg \omega'}{\bar{\Gamma}_M} = \frac{500 \cdot tg 15}{100} = 1,2 \text{ мм.}$$

$$2) 2y = \frac{500 \cdot tg \omega'}{\bar{\Gamma}_M} = \frac{500 \cdot tg 15}{400} = 0,3 \text{ мм.}$$

Ответ: 1) $2y = 1,2 \text{ мм}$, $\bar{\Gamma}_M = 100^x$
2) $2y = 0,3 \text{ мм}$, $\bar{\Gamma}_M = 400^x$

Задача 7.6

В диапроекторе используется лампа К220-100 с размером проекции светящегося тела 8×8 мм и световым потоком $\Phi = 1650$ лм. Объектив проектора имеет $f' = 80$ мм и $K = 4$. Коэффициент пропускания ОС $\tau_{o.c} = 0,7$. Определить освещённость экрана, расположенного на расстоянии 3 м от объектива проектора.

Решение:

$$E'_v = \pi L_v \tau_{o.c} \cdot \sin^2 \sigma'$$

$$L_v = \frac{\Phi}{4\pi Q}$$

$$Q = 8 \text{ мм} \cdot 8 \text{ мм} = 64 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$$

$$\sin \sigma' = \frac{D'}{2f'}$$

$$K = \frac{f'}{D} \Rightarrow D' = D = \frac{f'}{K}$$

$$E'_v = \frac{\pi \cdot \Phi \tau_{o.c} \cdot \left(\frac{f'}{K}\right)^2}{4\pi Q \cdot 4\rho'^2} = \frac{\Phi \tau_{o.c} \cdot f'^2}{16Q \cdot \rho'^2 K^2} = \frac{1650 \cdot 0,7 \cdot (80 \cdot 10^{-3})^2}{16 \cdot 64 \cdot 10^{-6} \cdot 3^2 \cdot 4^2} = 50 \text{лк}$$

Ответ: $E'_v = 50 \text{лк}$

Задача 7.7

Определить освещённость, создаваемую прожектором, на расстояниях 50м и 100м от него, если $\Phi = 105 \text{кЛм}$; $d = 4,3 \text{мм}$; $D = 500 \text{мм}$; $\tau_{o.c} = 0,8$; $\tau_a = 0,75$.

Решение:

Дистанция оформления светового пучка прожектора: $\rho_o = \frac{D}{d} f' = \frac{500}{4,3} \cdot 1000 = 116 \text{м.к.}$ $\rho_1 = 50 \text{м}$ и $\rho_2 = 100 \text{м}$

меньше ρ_o , то освещённость на этих расстояниях от прожектора будет одинаковой

$$E'_v = \tau_a \frac{l_{\text{впр}}}{\rho^2}; l_{\text{впр}} = l_v \cdot \tau_{o.c} \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^2$$

$$l_v = \frac{\Phi_v}{2\pi}$$

$$l_{\text{впр}} = \frac{\Phi_v}{2\pi} \tau_{o.c} \left(\frac{D}{d}\right)^2$$

$$E'_v = \frac{\tau_a \cdot \tau_{o.c} \cdot \Phi_v}{2\pi \rho^2} \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^2 = \frac{0,75 \cdot 0,8 \cdot 105 \cdot 10^3}{2 \cdot 3,14 \cdot (116)^2} \cdot \left(\frac{500}{4,3}\right)^2 = 6700,80 \frac{\text{ЛМ}}{\text{м}^2} = 6,7 \text{кЛк}$$

Ответ: $E'_v = 6700,80 \frac{\text{ЛМ}}{\text{м}^2} = 6,7 \text{кЛк}$

Задача 7.8

С какого максимального расстояния и в каком масштабе можно сфотографировать газетный текст (высота букв $h_1=1,5$ мм.) объективом с фокусным расстоянием 58 мм и фотографической разрешающей способностью в пределах кадра не хуже 40 мм^{-1} ?

Решение:

Высота изображения букв должна превышать минимальный разрешаемый элемент не менее чем в 5 раз, т. е. при $R = 40 \text{ мм}^{-1}$ минимальная высота изображения букв должна быть

$$h_{min} = (1/40) \cdot 5 = 0,125 \text{ мм.}$$

Тогда масштаб изображения, в котором необходимо фотографировать газетный лист бумаги, составит

$$|\beta| = h_{min} / h_1 = 0,125 / 1,5 = 0,083.$$

Максимальное расстояние:

$$L = f_{об} \cdot (2 + 0,083 + 1/0,083) = 819,609 \text{ мм.}$$

Ответ: 819,609 мм.

Задача 7.9

Определить фокусировочную подвижку объектива «Гелиос-89» ($f' = 30$ мм), если минимальная дистанция съемки составляет 1 м.

Решение:

$$z' = (L/2) (1 - \sqrt{4 f_{об}^2 / L}) - f_{об} = 1000/2 (1 - \sqrt{4 \cdot 30 / 1000}) - 30 = 0,958 \text{ мм.}$$

Ответ: 0,958 мм.

Задания на самостоятельную работу

Тема 1. Изучить типы разделительных призм, графоаналитический метод расчета плоских отражательных призм.

Тема 2. Способы графического построения изображений, методика определения кардинальных элементов по ходу осевого луча для многокомплексных систем.

Тема 3. Изучить расчет хода нулевых лучей, на практике – расчет типовых оптических систем.

Тема 4. Понятие абберационно-геометрического и фотограмметрического виньетирования.

Тема 5. Работа отдельной линзы в воздухе, влияние ее формы на aberrации.

Тема 6. Формулы для aberrаций III порядка по координатам aberrаций III порядка.

Тема 7. Изучить оценку разрешающей способности оптических систем с электронными приемниками излучения.

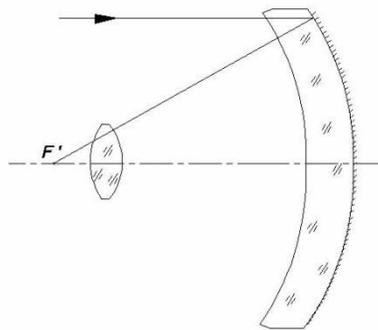
Тема 8. Освоить анализ хроматических aberrаций по графикам и расчету на ПЭВМ.

Индивидуальные карточки для самостоятельной работы

№ 1

1. Понятие сопряженных отрезков, пример.

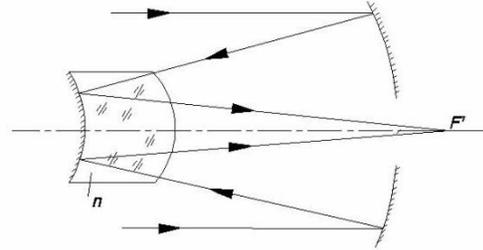
2. а) указать знаки r , d , n ; б) сколько рабочих поверхностей в ОС?



3. Найти положение изображения предмета, построенного тонкой линзой, если $f = -50\text{мм}$, $4z = -50$. Аналитическое решение проверить графически.

№ 2

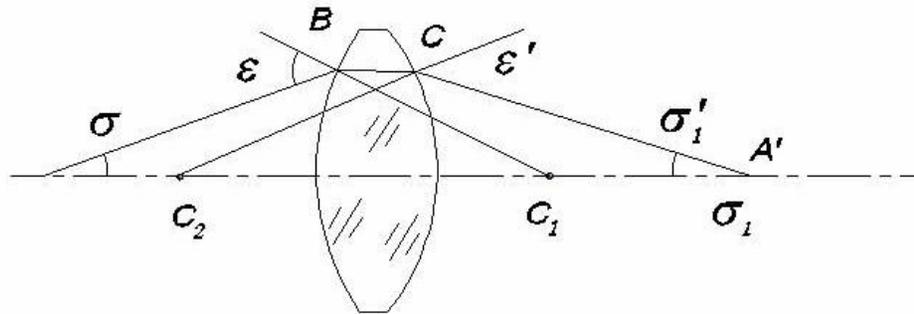
1. Какое изображение строит ОС, если из нее вышел расходящийся пучок лучей? Пояснить рисунком.
2. Сколько рабочих поверхностей? Указать знаки r , d , n .



3. Найти величину и положение изображения предмета, которое дает тонкая оптическая система, если $y = 30\text{мм}$, $f' = 60\text{мм}$, $a-a' = 240\text{мм}$.

№ 3

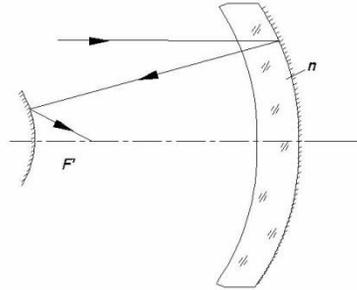
1. Какое изображение строит ОС, если из нее вышел сходящийся пучок лучей? Пояснить рисунком.
2. Указать знаки углов падения и преломления в точке В и С, а также $\angle \sigma$ и σ' .



3. Определить оптическую силу линзы, если $f = -10\text{ мм}$, $n = 1,33$, $n' = 1$.

№ 4

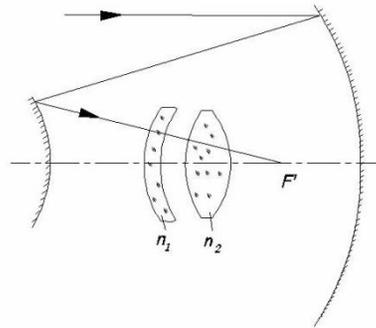
1. Понятие меридиональной плоскости. Сколько плоскостей (меридиональных) в центрированной ОС?
2. Сколько рабочих поверхностей в оптической системе? Указать знаки r , d , n .



3. Найти величину и положение изображения предмета, которое дает тонкая оптическая система, если $y = 10\text{мм}$, $f = 40\text{мм}$, $a-a' = 120\text{мм}$.

№ 5

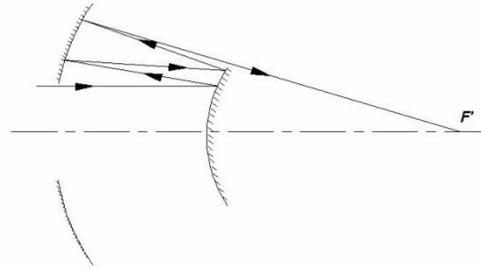
1. Можно ли получить на экране или зафиксировать на фотопленке мнимое изображение? Почему?
2. Сколько рабочих поверхностей в оптической системе? Указать знаки r , d , n .



3. Найти фокусное расстояние тонкой контактной линзы, если она служит для коррекции зрения в 2дптр..

№ 6

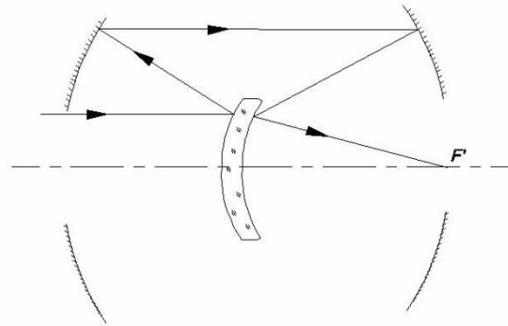
1. Что такое мнимое изображение? Может ли человек наблюдать мнимое изображение? Почему?
2. Сколько рабочих поверхностей в оптической системе? Указать знаки r , d , n .



3. Найти величину и положение изображения относительно тонкой линзы, если $z' = -20\text{мм}$, $f' = 20\text{мм}$.

№ 7

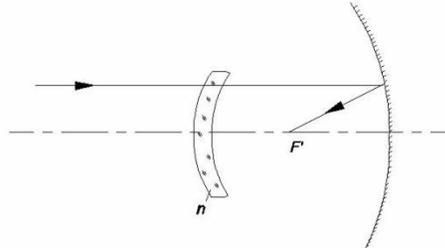
1. Какая оптическая система называется центрированной? Что называется оптической осью ОС?
2. Сколько рабочих поверхностей в оптической системе? Указать знаки r , d , n .



3. Найти величину и положение изображения в тонкой линзе $f' = 120\text{мм}$, если $y = 20$, $z = -4 z'$.

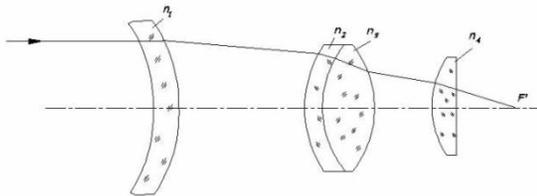
№ 8

1. Какие точки называются сопряженными? Привести пример.
2. Сколько рабочих поверхностей в оптической системе? Указать знаки r , d , n .
3. Определить величину и положение изображения в тонкой линзе, если $y = 10$, $f' = 120$, $z - z' = 2f'$.



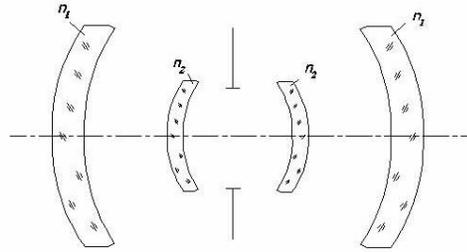
№ 9

1. Привести пример действительного и мнимого предмета (изобразить графически).
2. Сколько рабочих поверхностей в оптической системе? Указать знаки радиусов, толщин и показателей преломления оптических сред.
3. Определить положение изображения в тонкой линзе $f' = 200$, работающей с линейным увеличением $\beta = -5^x$.



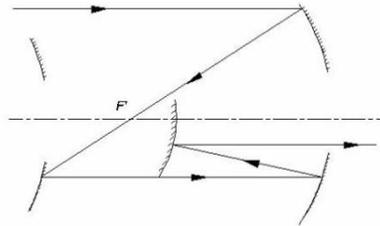
№ 10

1. Привести пример действительного и мнимого изображения (изобразить графически).
2. Сколько рабочих поверхностей в оптической системе? Указать знаки r , d , n .
3. Найти величину изображения в тонкой линзе, если $f = -50$ мм, $2z = -25$ мм, $n = 1$, $n' = 1,33$.



№ 11

1. Показать ход лучей после отражения от сферического выпуклого зеркала для: а) сходящегося; б) расходящегося; в) параллельного пучка лучей.
2. Сколько рабочих поверхностей в оптической системе? Указать знаки r , d , n .
3. Определить фокусное расстояние тонкой системы, если расстояние между предметом и изображением $L = 120$ мм, линейное увеличение $\beta = -1^x$.



№ 12

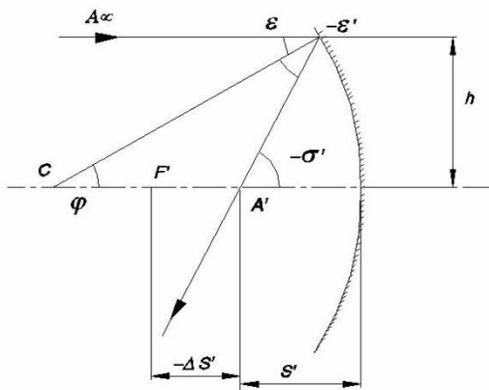
1. Действительный и мнимый предмет. Примеры.
2. Сколько рабочих поверхностей в оптической системе? Указать знаки r , d , n .
3. Какое увеличение применяет фотолюбитель, если объектив увеличителя с $f = 5$ см удален от плоскости фотобумаги на расстояние 30 см? Решение пояснить рисунком.

Упражнения и задачи для самостоятельной работы

Тема 6. Аберрации оптических систем

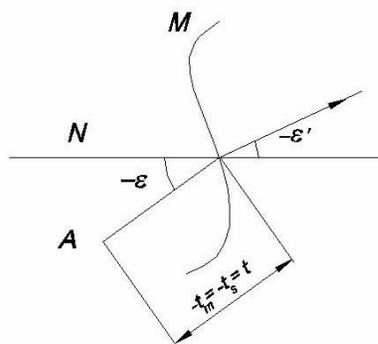
Задача № 1

Вывести точную формулу сферической аберрации вогнутого сферического зеркала для бесконечно удаленного предмета. Известно $r, h, \Delta S' = f(h, r)$: r – радиус зеркала, h – высота падения луча на зеркало.



Задача № 2

Из точки A , лежащей в одном из главных нормальных сечений асферической преломляющей поверхности M , падает бесконечно тонкий пучок лучей под углом ε к нормали N . Найти зависимость между радиусами кривизны меридионального и сагиттального сечений поверхности M при условии отсутствия астигматизма в заданной точке.



Задача №3

Решить задачу № 2, если в заданной точке происходит отражение бесконечно тонкого пучка лучей.

Задача №4

Решить задачу № 2, если предметная точка бесконечно удалена ($t_m = t_s = \infty$); преобразовать полученную формулу для случая отражения в заданной точке.

Задача №5

Определить радиусы поверхностей двухлинзового склеенного объектива–ахромата «флинт впереди» из пары стекол ТФ1 и К8. Считать линзы тонкими. $r_4 = \infty$. Фокусное расстояние объектива $f' = 200$ мм.

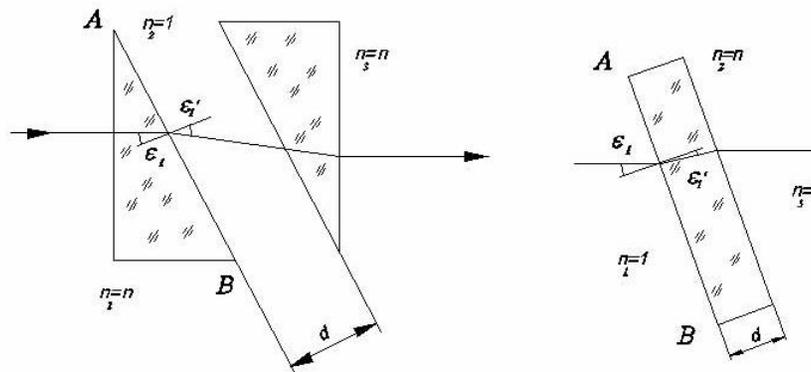
Задача №6

Величина смещения параксиальных лучей плоскопараллельной пластинкой в воздухе равна $\Delta S' = \frac{n-1}{n} a$.

Изменение $\Delta S'$ при изменении показателя преломления n для разных длин волн λ по смыслу хроматизм положения dS' . Найти формулу для dS' в пластинке и рассчитать его при $d = 50$ мм; стекло БФ21.

Задача №7

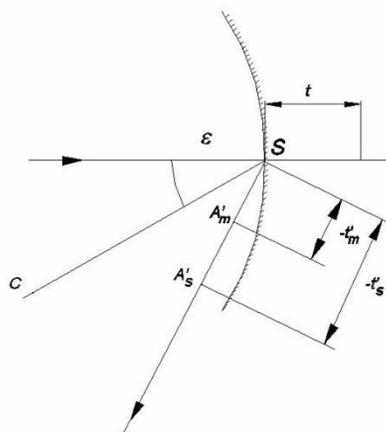
Во сколько раз астигматизм воздушной пластинки больше астигматизма стеклянной пластинки при равных углах падения ϵ_1 на наклонную грань АВ, толщинах d и показателях преломления n ?



Задача №8

Получить точную формулу астигматизма сферического зеркала, если расстояние от зеркала до предметной точки A равно t , а угол главного луча с нормалью к зеркалу равен ε . Частные случаи:

- 1) $\varepsilon = 0$, 2) $\varepsilon = 90^\circ$, 3) $t = 0$, 4) $t = \infty$, 5) $r \gg t$.



Задача №9

Рассчитать три последних радиуса кривизны тонких линз склеенного объектива (ахромата), с фокусным расстоянием $f' = 100$ мм из пары стекол БФ12 (впереди) и КФ4, если $r_4 = 100$ мм.

Задача №10

При каком условии продольная и поперечная сферическая аберрации совпадают по величине? Определить численно это условие для плоских границ воздух-вода, воздух-стекло ТФ5. Расстояние от границы раздела до точки предмета $S = -100$ мм. $n_{\text{воды}} = 1,33$ ($t = 20^\circ\text{C}$).

Задача №11

Определить продольную и поперечную сферическую аберрацию вогнутого сферического зеркала с радиусом кривизны $r = -1000$ мм и световым диаметром $D_{\text{св}} = 400$ мм для бесконечно удаленного предмета. Аберрации рассчитать для 2-х лучей.

Задача №12

Определить величины продольной и поперечной сферической aberrации, возникающей на плоской границе двух сред – воздуха и воды, для точки предмета, расположенной в воздухе на расстоянии – 100мм от границы сред. Расчет выполнить для лучей, составляющих с осью углы, равные $20^\circ, 30^\circ, 80^\circ$ градусов. Построить графики продольной и поперечной aberrации. $n_{\text{воды}} = 1,33$ ($t = 20^\circ\text{C}$).

Тема 7. Типовые оптические системы.

Задача №13

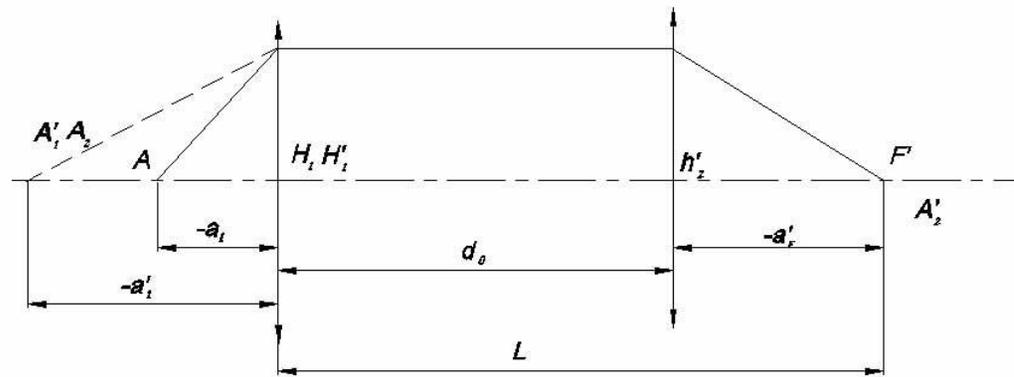
Объектив зрительной трубы имеет фокусное расстояние $f_1' = 300$, относительное отверстие 1:8, поле зрения $2\omega = 1^\circ 20'$. Фокусное расстояние окуляра $f_2' = 10$ мм. Определить диаметры зрачков входа и выхода, диаметр ПД. Вычислить перемещение окуляра и угловое увеличение зрительной трубы при фокусировке на расстояние $a_1 = -3000$ мм, а также определить перемещение окуляра относительно сетки при рефракции $D = \pm 5$ дптр.

Задача №14

Для рассматривания предметов малых размеров применяется лупа Стенхопа, представляющая собой положительную концентрическую линзу с $r_1 = 2/3d$. Определить: f' – фокусное расстояние; S_F и S'_F – положение фокальных плоскостей относительно поверхностей; r_1 и r_2 – радиусы кривизны поверхностей. Видимое увеличение лупы $\Gamma = 25^\times$, $n = 1,5183$.

Задача №15

Дана зрительная труба с внутренней фокусировкой с положительным фокусирующим компонентом. Фокусное расстояние объектива $f' = 150$ мм, длина $L = 195$ мм, расстояние между вторым компонентом и плоскостью сетки при фокусировке трубы на ∞ $d_F = d_2 = 15$ мм. Определить фокусные расстояния компонентов и расстояние между ними при фокусировке трубы на ∞ и на min расстояние.



Задача №16

Доказать теоретически, что коллектив не влияет на увеличение телескопической системы.

Задача №17

В земной зрительной трубе входной зрачок совпадает с первой поверхностью $t = 0$; фокусное расстояние объектива: $f_1' = 150$ мм, оборачивающей линзы $f_3' = 50$ мм.

Определить фокусное расстояние коллектива f_2' и длину трубы, если увеличение оборачивающей линзы $\beta = -1^x$, а всей системы $\Gamma = 6^x$. Построить ход лучей через всю ОС.

Задача №18

В зрительной трубе $f_{об}' = 150$ мм, фокусное расстояние компонентов симметричной оборачивающей системы $f_3' = f_4' = 200$ мм, а воздушный промежуток между компонентами $d_3 = 80$ мм. Каким должно быть расстояние коллектива зрительной трубы, если главный луч с целью уменьшения ошибок оборачивающей системы пересекает оптическую ось в середине промежутка d_3 ? Входной зрачок на первом компоненте $t = 0$.

Задача №19

Зрительная труба Кеплера имеет $f'_{об} = 100$ мм и световой диаметр объектива $D_{об} = 30$ мм. Найти величину зрачка выхода и его удаление от задней главной плоскости окуляра зрительной трубы, если $f'_{ок} = 10$ мм. Входной зрачок совпадает с объективом.

Задача №20

Если входной зрачок зрительной трубы совпадает с объективом, а главный луч проходит посередине между оборачивающими тонкими компонентами, то оптическая сила коллектива определяется по следующей формуле: $\Phi_2 = \Phi_1 + \Phi_3 \left(1 - \frac{d_3}{2} \Phi_3 \right)$. Доказать справедливость этой формулы.

Задача №21

В зрительной трубе ступенчатого переменного увеличения расстояние между фокальными плоскостями объектива ($f'_{об} = 75$ мм) и окуляра ($f'_{ок} = 25$ мм) сохраняется постоянным и равным $L = 600$ мм, изменение увеличений достигается двумя положениями одной оборачивающей линзы. Определить фокусное расстояние и величину перемещения Δ линзы для 2-х вариантов увеличения. Одно из увеличений трубы $\Gamma_1 = -6^X$.

Задача №22

Угловое увеличение теодолита равно 30^X , диаметр входного зрачка $D = 60$ мм. Определить угловой предел разрешения прибора и вычислить минимальный размер деления рейки, которые можно будет разрешить при измерении расстояний 3 км.

Задача №23

Зрительная труба Кеплера имеет видимое увеличение $\Gamma = -8^X$ и длину $L = 225$ мм, задний фокальный отрезок окуляра $S'_{Фок} = 0,4 f'_{ок}$. На каком расстоянии a_p от тонкого объектива расположен входной зрачок, если выходной зрачок удален от последней поверхности окуляра на расстояние $S'_{p'} = 11$ мм? $\Delta Z'_p = 0$ (сферическая абберация в зрачках).

Задача №24

Определить положение входного зрачка в телескопической системе Кеплера длиной $L = 150$ мм, если фокусное расстояние объектива $f'_{об} = 120$ мм, удаление выходного зрачка $S'_{р'} = 35$ мм, задний фокальный отрезок окуляра $S'_{Фок} = 30$ мм. Сферическая aberrация в зрачках $\Delta Z'_p = -2$ мм.

Задача №25

Рассчитать телескопические очки, образованные монокулярами, построенными по схеме Галилея с увеличением $\Gamma = 2^x$, при длине системы $L = 25$ мм, $a'_{р'} = 25$ мм (положение выходного зрачка относительно главной плоскости окуляра). Определить смещение окуляра, компенсирующего недостатки глаз, имеющих: а) дальность 3 дптр; б) близорукость 3 дптр.

Задача №26

Определить расстояние между объективом и окуляром телескопических очков ($L = 25$ мм), построенных по схеме Галилея с увеличением $\Gamma = 2^x$ ($a'_{р'} = 25$ мм – удаление выходного зрачка), если аметропия $\bar{A}_д = \pm 5$ дптр. Как изменится расстояние между объективом и окуляром, если с помощью рассчитанных очков рассматривать предметы, расположенные от объектива на расстоянии 450 мм?

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

Цель и задачи курсового проектирования

Курсовой проект является одним из основных моментов при формировании квалифицированных специалистов и рассматривается как подготовительный этап к выполнению дипломного проекта.

Цель курсового проекта заключается в углублении и практическом освоении студентами знаний, полученных ими на лекционных и практических занятиях по дисциплине ТиРОС, в развитии у студентов навыков самостоятельной работы расчетного и конструкторского характера.

При выполнении проекта от студентов потребуется:

- умение пользоваться технической литературой, справочными материалами, нормами, каталогами, стандартами;
- знание основ методики расчета оптических схем, выбора источников и приемников излучения в том числе с использованием ЭВМ);
- знание правил оформления конструкторской документации в соответствии ЕСКД.

Содержание курсового проекта и требования к его оформлению

Выполнение проекта ведется в соответствии с техническим заданием (ТЗ) на курсовое проектирование.

Техническое задание составляется руководителем курсового проекта 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 ориентировочную оптическую схему прибора с указанием необходимых усовершенствований. ТЗ оформляется на специальном бланке, подписывается руководителем проекта и утверждается заведующим кафедрой. Студент расписывается в принятии технического задания к исполнению.

Темой курсового проекта является разработка оптической системы оптического прибора (инструментального микроскопа с большим рабочим расстоянием, панорамного визира, панкратической системы для коллимации лазерного излучения и т.д.), а также может являться расчет оптической системы узла сложного оптического прибора (объектив фото-канала кинотеодолита и пр.).

Курсовой проект должен включать графическую часть объемом не менее трех листов формата А1 и расчетно-пояснительную записку.

В состав графической части входят:

- оптическая схема;
- схема хода лучей через оптическую систему прибора;
- графики аберраций.

В зависимости от сложности и насыщенности оптическая схема прибора может выполняться на листах формата А1 и А2. Схемы хода лучей выполняются без соблюдения масштаба, должны быть выполнены комплектно, но без ущерба для ясности и удобства чтения.

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 расчетно-пояснительной записки 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;
- подбор оптических комплектов по каталогам;
- расчет неунифицированных элементов оптики в области аберраций III порядка;
- оценка геометрических аберраций комплектов оптики и оптической системы в целом с помощью ЭВМ;
- светознергетический расчет;
- список использованной литературы;
- приложение (в т.ч. ведомость оптических деталей).

Титульный лист расчетно-пояснительной записки оформляется в соответствии с приложением.

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 проекта при выдаче задания.

Изложение пояснительной записки 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 40–50 листов. Оформление пояснительной записки курсового проекта производится в соответствии с СП БНТУ 3.01 – 2003 «Курсовое проектирование» и МИ БНТУ 3.001 – 2003 «ЕСС БНТУ».

Последовательность выполнения курсового проекта

Задание на курсовой проект студент получает на 1-й неделе (IV 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 17 часов аудиторных занятий. Внеаудиторная самостоятельная работа студента должна составлять примерно 30 часов.

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 2ω .

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].

После определения параметров всех оптических элементов необходимо выбрать подходящие из готовых элементов, а при отсутствии таковых определять конструктивные элементы из габаритного расчета.

Для выбора комплектов 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].

Этапы	Неделя	Наименование этапов	Контрольные сроки
1	3	Анализ ТЗ. Выбор оптической схемы прибора.	Третья декада сентября
2	6	Выполнение габаритного расчета оптической схемы.	Вторая декада октября
3	9	Выбор комплектов оптики по каталогу.	Первая декада ноября
4	10	Аберрационный расчет неунифицированных оптических элементов.	Вторая декада ноября
5	11	Оценка aberrаций оптической системы на ЭВМ.	Третья декада ноября
6	12	Светотехнический расчет.	Первая декада декабря
7	14	Выполнение чертежей. Оформление расчетно-пояснительной записки.	Вторая декада декабря
8	16	Защита проекта.	Третья декада декабря

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 прибора (например, АКФ – автоколлиматор фотоэлектрический);
- 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 аберрации 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.

Так для **телескопических систем** следует привести: видимое увеличение, угловое поле оптической системы в пространстве предметов, диаметр выходного зрачка, удаление выходного зрачка от последней поверхности, предел разрешения, коэффициент пропускания (при необходимости).

Для **фотографических объективов**: фокусное расстояние, относительное отверстие, угловое поле оптической системы или размер кадра, разрешающую способность, коэффициент пропускания.

Для **фотоэлектрических систем**: размеры фотокатодов или типы фотоприемников, размеры светового пятна на фотокатодах.

Кроме того, на оптических схемах следует указывать дополнительные сведения: расстояние от последней поверхности фотографического 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 относи-

тельно механической части прибора; габаритные или установочные размеры, например, длину базы, высоту выноса плоскости изображения (при необходимости).

Требования к оформлению оптического выпуска на оптическую систему. Для окончательного варианта системы с округленными по ГОСТ радиусами кривизны составляется оптический выпуск, который содержит чертеж оптической системы, ее 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 , v), 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 астигматических пучков для различных точек поля: меридиональная и сагиттальная кривизна поверхности изображения, астигматизм, 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 $m_3 = (m_{кр} / \sqrt{2})$.

Aberrации главных лучей и наклонных пучков рассчитывают для двух или трех точек поля у объективов с угловым полем до 60° и для четырех или пяти точек поля для широкоугольных объективов.

Аберрации широких наклонных пучков определяют на основании расчета четырех лучей 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 допускается виньетирование части наклонного пучка оправами 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 оптической системы 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 оптическом выпуске указывают величину смещения ПНУ относительно плоскости Гаусса.

Порядок защиты проекта

Оформленный курсовой проект подписывается студентом и руководителем и представляется к защите. Защита проводится перед комиссией, состоящей из трех человек (преподавателей). Защита проекта состоит из доклада продолжительностью 5–7 минут и ответов на вопросы членов комиссии.

Может быть рекомендован следующий примерный план построения доклада:

- название темы проекта;
- назначение разрабатываемого оптического прибора;
- исходные данные для проектирования;
- краткий обзор существующих аналогов;
- перечень выполненных расчетов с указанием их цели и результатов;
- пояснения конструктивных особенностей оптической системы прибора;
- оценка и анализ качества изображения.

По окончании доклада и ответа на вопросы комиссия принимает решение об оценке курсового проекта.

Рекомендуемая литература

1. Теория оптических систем. Рец. 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. Рец. 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;
- проведение текущих контрольных работ (заданий) по отдельным темам;
- защита выполненных на практических и 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
1 (один)	Отсутствие приращения знаний и компетентности в рамках дисциплины; отказ от ответа
2 (два)	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
3 (три)	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
4 (четыре)	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 дис-

	циплины, умение под руководством преподавателя решать стандартные (типовые) задачи; умение ориентироваться в основных теориях, методах и направлениях дисциплины и давать им оценку; работа под руководством преподавателя на практических занятиях, допустимый уровень культуры исполнения заданий
5 (пять)	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
6 (шесть)	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
7 (семь)	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>8 (восемь)</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>9 (девять)</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>10 (десять)</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

Тема 1. Изучить типы разделительных призм, графоаналитический метод расчета.

Тема 2. Способы графического построения изображений, методика определения кардинальных элементов по ходу осевого луча для многокомплексных систем.

Тема 3. Изучить расчет хода нулевых лучей, на практике – расчет типовых оптических систем.

Тема 4. Понятие абберационно-геометрического и фотограмметрического виньетирования.

Тема 5. Работа отдельной линзы в воздухе, влияние ее формы на абберации.

Тема 6. Формулы для аббераций III порядка по координатам аббераций III порядка.

Тема 7. Изучить оценку разрешающей способности оптических систем с электронными приемниками излучения.

Тема 8. Освоить анализ хроматических аббераций по графикам и расчету на ПЭВМ.

Вопросы к экзаменам по дисциплине (теоретическая часть)

Список вопросов к экзамену (5 семестр)

1. Основные законы и принципы геометрической оптики.
2. Основные понятия: сопряженные плоскости, действительное и мнимое изображение и т.д..
3. Правило знаков.
4. Явление полного внутреннего отражения. Примеры использования.
5. Конструктивные параметры оптической системы.
6. Оптическое бесцветное стекло (стандарт, характеристики, параметры, марки).
7. Цветные оптические стекла.
8. Оптические керамики, кристаллы.
9. Нетрадиционные оптические материалы.
10. Основные положения идеальной системы.
11. Кардинальные элементы оптической системы. Инвариант Лагранжа-Тельмгольца.
12. Линейное, угловое и продольное увеличения. Связь между увеличениями.
13. Формула Ньютона, формула Гаусса (отрезков).
14. Формулы для расчета положения и величины изображения через идеальную систему.

15. Плоскопараллельная пластина (удлинение, редуцирование). Расчет хода лучей.
16. Плоские зеркала. Поворот плоского зеркала, двойные зеркала.
17. Преломляющий клин. Преломляющие призмы.
18. Призмы (развертка, призмы с крышей, оборачивание, расчет размеров).
19. Инварианты Аббе. Понятие оптического инварианта.
20. Параксиальные и нулевые лучи.
21. Уравнения высот и углов нулевого луча.
22. Кардинальные элементы отдельной сферической поверхности.
23. Вогнутые и выпуклые зеркала. Кардинальные элементы зеркал (фокусные расстояния, главные плоскости, оптическая сила и др.).
24. Формулы углов и высот нулевого луча в многокомпонентной системе. Понятие компонента.
25. Кардинальные элементы для линзы конечной толщины, расположенной в однородной и неоднородной среде (фокусные расстояния, главные плоскости, оптическая сила и т.д.).
26. Различные типы положительных и отрицательных линз. Положения главных плоскостей в них.
27. Виды линз: концентрические, телескопические, асферические линзы.
28. Апертурная диафрагма. Входной и выходной зрачки.
29. Полевая диафрагма. Поле зрения ОС.
30. Виньетирование. Виньетирующая диафрагма.
31. Методика определения АД. Действующее отверстие ОС.
32. Коэффициенты виньетирования.
33. Передняя и задняя апертура ОС. Относительное отверстие ОС.
34. Расчет поля зрения ОС из условий допустимого виньетирования.
35. Аберрационное виньетирование.
36. Понятие главных и апертурных лучей. Телецентрический ход главного луча.

Список вопросов к экзамену (6 семестр)

1. Понятие аберраций, их геометрический смысл.
2. Сферическая аберрация.
3. Кома.
4. Астигматизм и кривизна изображения.

5. Дисторсия.
6. Хроматизм положения.
7. Хроматизм увеличения.
8. Вторичный спектр.
9. Апланатические линзы.
10. Основные характеристики глаза.
11. Коррекция недостатков зрения.
12. Оптические характеристики телескопической системы.
13. Ограничение пучков лучей в телескопической системе.
14. Фокусировка окуляра в зрительной трубе.
15. Расчет коллектива.
16. Объективы и окуляры телескопических систем.
17. Оптическая система лупы.
18. Оптическая система микроскопа.
19. Глубина изображаемого пространства в микроскопе.
20. Разрешающая способность микроскопа.
21. Осветительные системы микроскопа.
22. Основные оптические характеристики фотообъективов. Классификация фотообъективов.
23. Глубина изображаемого пространства, глубина резкости фотообъектива.
24. Разрешающая способность фотообъектива.
25. Расчет системы Кеплера.
26. Расчет системы Галилея.
27. Осветительные системы проекционных приборов.
28. Линзовые конденсоры. Расчет на минимум сферической аберрации.
29. Оптические характеристики проекционных систем. Виды оптической проекции.
30. Габаритный расчет эпископической проекционной системы.
31. Габаритный расчет диаскопической проекционной системы.
32. Принципы волновой оптики: понятие эйконала, условие таутохронизма, волновые аберрации.
33. Дифракция безабберационного объектива. Критерии разрешающей способности.
34. Частотно-контрастная характеристика. Пограничная кривая.

Вопросы к экзаменам по дисциплине (практическая часть)

Задачи к экзамену (5 семестр)

1. Доказать, что для системы из двух отдельных линз малому перемещению ΔZ_1 предмета относительно переднего фокуса первой линзы соответствует малое перемещение ΔZ_2 изображения относительно заднего фокуса второй линзы, определяемого формулой:

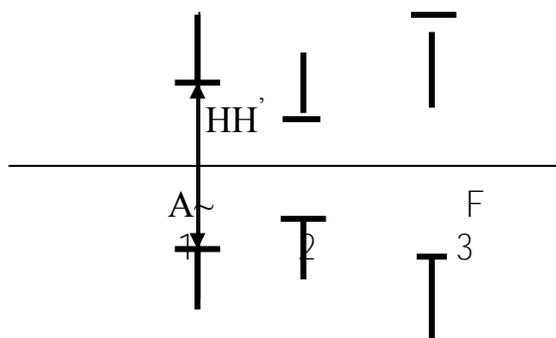
$$\Delta Z_2' = \Delta Z_1 \cdot \left(\frac{f_2'}{f_1} \right)^2$$

2. Определить величину изображения y' , если $y = 30$, $-f = f' = 120$, $z = -4z'$.

3. На расстоянии $z = -300$ мм от переднего фокуса системы, заданной главными плоскостями HH' , находится светящаяся площадка размером 60×80 мм, расположенная перпендикулярно оптической оси, центр ее находится на оптической оси. Фокусные расстояния $f = -100$ мм, $f' = 150$ мм. Определить положение и размеры изображения площадки.

4. Объектив зрительной трубы, предназначенной для наблюдения ИСЗ, имеет фокусное расстояние $f' = 1000$ мм. Определить минимальный диаметр ПД, при котором в поле трубы будут одновременно видны два спутника, если расстояние между ними 5 км. Удаление спутников от поверхности Земли 200 км, наблюдение ведется в зените.

5. Представлены: одиночная тонкая линза в оправе 1, материальные диафрагмы 2, 3. Найти графически входной и выходной зрачки, АД, ПД и виньетирующую диафрагму. Предметная плоскость расположена в бесконечности.



6. Определить положение и величину изображения, если на расстоянии $z = -200\text{мм}$ от переднего фокуса системы расположен предмет $y = 40$. $-f = 50$, $f' = 80$.

7. Найти формулы для отрезков a_1 и a_2 и для расстояния Δ , на которое нужно переместить тонкий компонент, если линейное увеличение изменяется в k раз и расстояние между предметом и изображением равно L и остается постоянным. Найти формулу для фокусного расстояния компонента.

$$\left| \frac{\beta_1}{\beta_2} \right| = k$$

8. Тонкая линза с $f_1' = 130$ мм проецирует на экран действительное изображение предмета, с 5-ным увеличением. Определите взаимное расположение предмета, линзы и экрана. Как оно изменяется, если:

а) вторая среда – вода;

б) первая среда – вода ($n = 1,33$)?

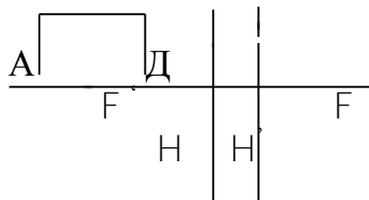
9. Объектив состоит из двух тонких компонентов, расположенных на расстоянии $d = 80$ мм. Фокусное расстояние первого $f_1' = 120$ мм, второго – $f_2' = 110$ мм. На каком расстоянии от второго компонента нужно установить ПД, если предметная плоскость расположена в бесконечности? Найти угловое поле в пространстве предметов, если $D_{\text{ПД}} = 17,6$ мм.

10. Найти фокусное расстояние тонкого компонента в воздухе, если расстояние между предметом и изображением $L = 240$ и $\beta_0 = -2^x$.

11. Определить расстояние от передней главной точки тонкого компонента до предмета, если дано: $y = 50\text{мм}$, $y' = -200\text{мм}$, $z' = 160\text{мм}$, $-f = f'$.

12. Определить высоту h_2 точки пересечения луча со второй линзой и положение заднего фокуса для системы из 2-х тонких линз. Падающий луч параллелен оптической оси. $f_1' = 100$ мм, $f_2' = -50$ мм, $d = 20$ мм, $h_1 = 40$ мм.

13. Построить изображение квадрата ABCD в оптической системе, заданной главными плоскостями HH' . ОС находится в однородной среде.



14. Определить величину и положение фотографируемого в воде предмета относительно тонкого фотообъектива с $f' = 50$ мм, если изображение величиной $y' = 20$ мм, находящегося за объективом на расстоянии $a' = 51,2$ мм.

15. Объектив зрительной трубы имеет фокусное расстояние $f_1' = 300$ мм, относительное отверстие $D/f_1' = 1:8$, угловое поле зрения $2\omega = 1^\circ 20'$. Фокусное расстояние окуляра $f_2' = 10$ мм. Определить диаметр входного зрачка, диаметр выходного зрачка, диаметр ПД.

Задачи к экзамену (6 семестр)

1. Аэрофотографирование ведется с самолета, летящего на высоте 5000 м со скоростью 450 км/ч, фотоаппаратом с объективом ($f = 300$ мм). Допустимый сдвиг изображения за время экспонирования составляет 0,03 мм. Какова максимальная выдержка?

2. Угловое увеличение теодолита равно 30^x , диаметр входного зрачка $D = 60$ мм. Определить угловой предел разрешения прибора и вычислить минимальный размер деления сетки, которые можно будет различать при измерении расстояний 3 км.

3. В трубе Галилея фокусное расстояние объектива $f_{OB}' = 90$ мм, окуляра $f_{OK}' = -30$ мм. Определить расстояние L между объективом и окуляром при установке окуляра на -5 дптр. Выходной зрачок удален относительно окуляра на расстояние $l' = 25$ мм. Объектив и окуляр считать тонкими.

4. Бинокль имеет видимое увеличение $\Gamma_T = 7,5^x$, угловое поле $2\omega = 8^\circ$, диаметр выходного зрачка $D' = 5$ мм. Определить размеры линейного поля и линейный предел разрешения, которые обеспечивает бинокль или система бинокль с глазом, предметов, удаленных на расстояние $p = 4$ км.

5. В прожекторе используется источник света с силой $I_B = 1000$ кд, диаметр которого $d = 10$ мм. Диаметр выходного зрачка прожектора $D' = 200$ мм, коэффициент пропускания $\tau_{OC} = 0,8$.

6. Определить световой поток, падающий от прожектора на расстоянии $p' = 100$ м. Фокусное расстояние оптической системы $f' = 250$ мм.

7. Зрительная труба Кеплера имеет $f_{OB}' = 100$ мм и световой диаметр объектива $D_{OB} = 30$ мм. Найти величину зрачка выхода и его удаление от задней главной плоскости окуляра зрительной трубы, если $f_{OK} = 10$ мм. Входной зрачок совпадает с объективом.

8. Вычислить угловой предел разрешения зрительной трубы, имеющий видимое увеличение $\Gamma = 8^x$ и диаметр выходного зрачка $D' = 4$ мм:

- а) по теории дифракции;
- б) из возможностей глаза.

9. В микроскопе используется окуляр с $f' = 25\text{мм}$, полем зрения $2\omega' = 40^\circ$. Определить увеличение и линейное поле микроскопа, если $\beta_{OB} = -10^x$.

10. В микроскопе $\Gamma_M = -150^x$ используется объектив $f = 10\text{ мм}$ и окуляр $f = 25\text{ мм}$. Каково будет видимое увеличение микроскопа, если оптическую длину тубуса Δ_o увеличить (уменьшить) на 30 мм?

11. Какой наибольшей величины объект можно рассматривать при постоянном оптическом тубусе микроскопа с увеличением $\Gamma_M = 400^x$ для окуляра 10^x , поле зрения которого $2y = 14\text{ мм}$?

12. Рассчитать ахроматический клин (σ_1 и σ_2), если $\alpha = 3^\circ$, склеенного из двух стекол БФ12, КФ4.

13. Доказать теоретически, что коллектив не вносит влияния на увеличение телескопической системы.

14. Определить хроматизм положения толстого мениска с равными радиусами. Предмет расположен на бесконечности. $f' = 150\text{ мм}$, $n = 1,7462$. Стекло ТФ4.

15. Определить радиусы кривизны линз склеенного объектива – ахромата «флинт впереди» с фокусным расстоянием $f = 200\text{ мм}$ из пары стекол ТФ1 и К8. Линзы считать тонкими, а последнюю поверхность объектива плоской.

16. Определить необходимую яркость источника света проекционной диаскопической системы с увеличением $\beta = 100^x$, если по техническим условиям на расчет этой системы заданы освещенность экрана 100 лк и в качестве проекционного объектива используется фотообъектив «Юпитер–9». Коэффициент светопропускания $\tau = 0,2$ (для всей системы). Оптические характеристики объектива «Юпитер – 9»: $f' = 84,51\text{мм}$, $S_F = -74,04\text{мм}$, $S_F' = 40,77\text{мм}$, $\Sigma d = 53,85\text{ мм}$.

17. Фотоувеличитель состоит из лампы накаливания, матированная поверхность колбы которой имеет $L = 2500\text{ кд/м}^2$, конденсора и объектива ($f = 52$), $\tau_{OC} = 0,6$. Определить освещенность фотобумаги на столе фотоувеличителя, если диафрагменное число: $K_1 = 3,5$, $K_2 = 5,6$. Формат отпечатка 12x18 см, формат негатива 24 x 36 мм. Выходной зрачок объектива совпадает с его задней главной плоскостью.

18. Определить фокусное расстояние объектива микроскопа, имеющего $\Gamma_M = 400^x$, $f_{OK}' = 25\text{мм}$. Расстояние между предметом и его изображением после микрообъектива 180 мм.

Примерный перечень контрольных вопросов к лабораторным работам

Лабораторная работа №1

1. Причины возникновения монохроматических aberrаций. Их виды.
2. Влияние монохроматической aberrации на гомоцентричность пучка, строящего изображение.
3. Картины рассеяния в изображении точки при наличии а) сферической aberrации; б) комы; в) астигматизма.
4. Дисторсия. Зависимость дисторсии от положения входного зрачка.
5. Определение геометрической и волновой aberrации.
6. Зависимость сферической aberrации от апертуры оптической системы.
7. Зависимость комы от величины угла поля зрения.
8. Причины возникновения хроматических aberrаций.
9. Вторичный спектр. Ахроматы и апохроматы.

Лабораторная работа №2

1. Назначение и виды телескопических систем.
2. Основные оптические характеристики телескопических систем.
3. Оптические схемы зрительной трубы Кеплера и Галилея.
4. Конструктивные условия образования телескопических систем.
5. Связь видимого увеличения телескопической системы с линейным увеличением в зрачках.
6. Ограничение апертурных и полевых лучей.
7. Разрешающая способность телескопической системы.
8. Методы измерения углового поля зрения и диаметра выходного зрачка.
9. Методика определения разрешающей способности.

Лабораторная работа №3

1. Дифракционная разрешающая способность оптических систем. Критерий Релея.
2. Линейный и угловой пределы разрешения объектива.

3. Полезное увеличение оптических систем.
4. Штриховые миры.
5. Визуальная и фотографическая разрешающая способность фотообъектива.
6. Экспериментальная схема для исследования разрешающей способности.
7. Назначение коллиматора, микроскопа в лабораторной установке.
8. Положение апертурной диафрагмы и зрачков у фотообъектива.
9. Ограничение пучков в фотообъективе.
10. Классификация и основные оптические характеристики фотообъективов.
11. Частотно-контрастная характеристика.
12. Критерий добротности.

Лабораторная работа №4

1. Оптическая система глаза и основные характеристики глаза.
2. Бинокулярное и стереоскопическое зрение.
3. Строение глаза: а) глазное дно; б) сетчатка; в) хрусталик.
4. Понятия аккомодации, адаптации, остроты зрения.
5. Недостатки зрения.
6. Расчёт очковой линзы для близорукого глаза.
7. Коррекция зрения дальнозорного глаза.
8. Основные характеристики прибора ДО-3.
9. Оптическая схема ДО-3 без очковой линзы и с ней. Ход лучей.
10. Методика измерения рефракции очковой линзы.
11. Схема офтальмоскопа. Методика работы на офтальмоскопе.
12. Приборы для исследования глазного дна.

Лабораторная работа №5

1. Состав оптической системы проекционных систем.
2. Типы осветительных систем. Выбор источников света проекционных систем.
3. Требования к проекционным объективам.

4. Характеристики проекционных систем.
5. Абберационный расчет проекционных объективов.
6. Абберационный расчет линзовых конденсоров.
7. Расчет эпи-систем и диа-систем.
8. Ход лучей при эпи – проекции (внеосевые и осевые пучки).
9. Ход лучей при диа- проекции (внеосевые и осевые пучки).
10. Габаритные, световые и электрические параметры ламп накаливания оптических приборов.
11. Светотехнический расчет проекционных приборов.
12. Нетрадиционные элементы проекционных систем.

Лабораторная работа №6

1. Что можно измерить на фотометре ФМШ-56М?
2. Методика измерения коэффициента отражения и пропускания.
3. Определение коэффициентов светопропускания, отражения и поглощения.
4. Что такое фотометрическое равновесие и как оно используется при измерениях?
5. Определение оптической плотности. В каких единицах она измеряется?
6. Как вычислить коэффициент светопоглощения?
7. Категории стекла по коэффициенту светопоглощения.
8. Какова точность измерения на ФМШ-56М?
9. Что называется светофильтром? Марки светофильтров.
10. Что такое спектральная характеристика светофильтра? Интервал пропускания светофильтра.
11. Как рассчитывается коэффициент светопропускания оптической системы?
12. Визуальные методы фотометрии (метод полей сравнения и метод гашения).

Лабораторная работа №7

Часть 1 – Линза

1. Кардинальные элементы для выпуклоплоской и плосковогнутой линзы: f , S_F , S'_F , S_H , S'_H , Δ_{HH} .
2. Допуски материала на оптическую однородность.
3. Расчет светового диаметра линзы (стандарт). Выбор толщины линзы.

4. Кардинальные элементы линзы. Главные плоскости в исследуемой линзе.
5. Оптическая сила линзы (3 примера).
6. Конструктивные параметры линзы. Какие фаски нормализуются.
7. Кардинальные элементы концентрической линзы.
8. Конструктивные параметры линзы.
9. Контроль поверхностей линзы по пробным стеклам, класс точности ПС.
10. Чертеж концентрической отрицательной или положительной линзы с главными плоскостями.
11. Чертеж телескопической линзы с главными плоскостями.
12. Правило пересчета линз на другое f' , объяснить масштабирование.

Часть 2 – Призма

1. Зеркальные покрытия в призмах – типы, условия нанесения.
2. Допуски N , ΔN – на отражающие и преломляющие грани.
3. Погрешности изготовления призм. Допуски на углы в призме, пирамидальность.
4. Полупента – призма: развертка, характеристики.
5. Преимущества призм перед зеркалами.
6. Пузырность и бессвильность – как назначать категорию и класс.
7. Коэффициент призмы. Расчет световых размеров призм. Графоаналитический метод И.А. Турыгина.
8. Развертка и характеристики призмы Шмидта.
9. Примеры призм, работающих с полным внутренним отражением.
10. Оборачивание в призмах. Призма с крышей, пример.
11. Пример пространственной призмной системы.
12. Редуцирование призм, практическое применение.

Лабораторная работа №8

1. Методика определения АД.
2. Входной и выходной зрачок: расчет положения и размера.
3. Телецентрический ход главного луча в пространстве предметов и изображений.
4. Понятие главного луча. Какой луч определяет поле зрения.
5. Передняя и задняя апертура оптических систем.
6. Геометрическое виньетирование.

7. Диффрагмы оптических систем.
8. Центральное экранирование. Пример ОС, работающей с экранированием.
9. Относительное отверстие, диффрагменное число.
10. Кольцевая форма входного зрачка, эффективное относительное отверстие.
11. Полевая диффрагма ОС.
12. Коэффициенты виньетирования. Действующая площадь входного зрачка.

Лабораторная работа №9

1. Что можно измерить на приборе яркомер-люксметр ЯРМ-3? Какова точность измерения.
2. Методика измерения яркости и освещенности.
3. Коэффициенты пропускания, отражения, поглощения (определения).
4. Энергетические величины: а) поток, б) сила излучения, в) освещенность.
5. Энергетические величины: а) экспозиция; б) яркость; в) светимость.
6. Световые величины: а) сила света; б) световой поток; в) освещенность.
7. Световые величины: а) светимость; б) яркость; в) Закон Ламберта.
8. Механический и световой эквиваленты.
9. Определение оптической плотности. В каких единицах она измеряется?
10. Категории стекла по коэффициенту светопоглощения.
11. Что называется светофильтром? Марки светофильтров.
12. Расчет освещенности в осевой и внеосевой точке изображения. Функция светораспределения.
13. Формулы расчета коэффициента светопропускания оптической системы.

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

ВЫДЕРЖКИ ИЗ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ ДИСЦИПЛИНЫ

Согласно типовым учебным планам на изучение дисциплины «Теория и расчет оптических система» отведено максимально 354 ч., в том числе 166 ч. аудиторных занятий, из них лекции – 68 ч., практические занятия – 66 ч., лабораторные работы – 32 ч.

Примерный тематический план

Наименование раздела и темы	Лекции (часы)	Практические занятия (часы)	Лабораторные занятия (часы)	Всего аудиторных часов
Раздел I. Опотехника и теоретические положения				
Тема 1. Основные понятия, законы геометрической оптики, оптические материалы	6	4		10
Тема 2. Идеальная оптическая система	6	6		12
Тема 3. Оптика нулевых и параксиальных лучей	4	4		8
Тема 4. Оптические детали	4	2	8	14
Тема 5. Ограничение пучков лучей в реальных ОС	4	4	4	12
Тема 6. Оптическая система как передатчик лучистой энергии	4	4		8
Тема 7. Аберрации оптических систем	6	4	4	14
Раздел II. Расчеты типовых оптических систем				
Тема 8. Классификация оптических систем	2			2
Тема 9. Телескопические системы	6	6	4	16
Тема 10. Оптическая система лупы и микроскопа	4	4		8
Тема 11. Оптические системы фото-кино-телеобъективов	4	2	4	10
Тема 12. Зеркальные и зеркально-линзовые системы	2	2		4
Тема 13. Проекционные оптические системы.	4	2	4	10
Тема 14. Системы стереоскопического видения	2			2
Тема 15. Оптические системы оптико-электронных и лазерных приборов	4	2		6
Раздел III. Компьютерные расчеты и оценка качества				

изображения				
Тема 16. Элементы теории образования изображения	4	2	2	8
Тема 17. Основы автоматизации расчета оптических систем	2	2	2	6
ВСЕГО	68	50	32	150
Курсовое проектирование				16
ИТОГО				166

СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

РАЗДЕЛ I. ОПТОТЕХНИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Тема 1. Основные понятия, законы геометрической оптики, оптические материалы

Предмет и содержание дисциплины, связь с другими дисциплинами. Краткий обзор литературы. Современные достижения и перспективы проектирования и расчета оптических систем в Республике Беларусь и за рубежом. Основные этапы развития оптотехники.

Светящаяся точка и световой луч, оптическая длина пути. Правила знаков. Гомоцентрический и стигматический пучки света. Законы распространения света. Принцип Ферма и обратимости. Преломление лучей плоской поверхностью. Отражение лучей плоским зеркалом.

Оптическое бесцветное стекло. Стекла с особыми свойствами. Цветное стекло. Оптические кристаллы, керамика.

Тема 2. Идеальная оптическая система

Свойства идеальной системы. Предмет и изображение, кардинальные точки и отрезки идеальной оптической системы. Построение хода лучей и изображений. Формула Ньютона и формула отрезков. Линейное, продольное и угловое увеличения. Узловые точки оптической системы. Инвариант Лагранжа-Гельмгольца. Бесконечно тонкий компонент. Нахождение кардинальных элементов путем расчета хода.

Тема 3. Оптика нулевых и параксиальных лучей

Параксиальные лучи. Инвариант Аббе. Вычисление хода параксиальных лучей. Оптическая сила, фокусные расстояния преломляющей и отражающей поверхности.

Нулевые лучи, положение главных плоскостей. Инвариант Гюйгенса – Гельмгольца. Расчет хода нулевого луча через многокомпонентную систему с известными фокусными расстояниями. Графические методы построения хода нулевого луча.

Тема 4. Оптические детали

Призмы, их классификация по назначению и типам. Методы определения размеров призм и призмённых систем. Развертка призм. Бипризмы.

Виды оптических линз. Оптическая сила линзы конечной толщины.

Плоскопараллельные пластинки. Оптические клинья.

Зеркала. Сферические и асферические отражающие поверхности. Линзы Френеля и аксиконы.

Тема 5. Ограничение пучков лучей в реальных оптических системах

Диафрагмы и экраны. Апертурный луч и числовая апертура. Апертурная диафрагма, входной и выходной зрачки. Оптические инварианты, отнесенные к зрачкам.

Главный луч. Полевая диафрагма, поле зрения оптических систем.

Виньетирование, его виды. Влияние явления на энергетические параметры. Виньетирующая диафрагма. Коэффициенты геометрического виньетирования, расчет.

Тема 6. Оптическая система как передатчик лучистой энергии

Источники излучения. Лучистая энергия и лучистый поток. Распределение лучистого потока по спектру. Видимая область излучения.

Энергетические и фотометрические величины. Механический эквивалент света, коэффициенты видности. Световой поток. Освещенность изображения. Светосила оптических систем.

Потери световой энергии в оптических системах. Способы уменьшения коэффициента отражения. Поглощение света в оптических средах. Просветление оптики. Расчет коэффициента светопропускания в оптических системах.

Тема 7. Аберрации оптических систем

Понятие об аберрациях. Причины появления монохроматических аберраций. Классификация разложение аберраций III порядка. Геометрический смысл аберраций.

Сферическая аберрация и кома. Полевые аберрации: астигматизм, кривизна изображения и дисторсия. Фигуры рассеяния монохроматических аберраций. Инварианты Юнга.

Хроматические аберрации I порядка. Хроматизм положения, хроматизм увеличения. Вторичный спектр. Ахроматизация и апохроматизация оптических систем. Суммирование аберраций.

РАЗДЕЛ 2. РАСЧЕТЫ ТИПОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Тема 8. Классификация оптических систем

Назначение оптических приборов, их классификация и функциональные схемы. Элементная база оптических приборов. Оптическая система как основной компонент оптического прибора. Основные характеристики и типы оптических систем.

Тема 9. Телескопические системы

Глаз как оптическая система. Основы физиологии оптики глаза. Аккомодация. Виды аметропии глаза и ее коррекция. Стереоскопическое зрение, конвергенция. Основы диоптрийного исчисления.

Телескопические системы. Характеристики, конструктивные условия, ограничение пучков лучей. Простые зрительные системы Кеплера и Галилея. Методы габаритного расчета сложных зрительных труб с внутренней фокусировкой, с призмными и линзовыми оборачивающими системами. Особенности расчета зрительных труб с электронно-оптическими преобразователями. Объективы и окуляры зрительных труб. Зрительные трубы переменного увеличения.

Тема 10. Оптическая система лупы и микроскопа

Оптические системы микроскопа и лупы, их характеристики и элементы, ограничение пучков. Видимое увеличение, апертура и поле зрения.

Геометрическая и дифракционная теория микроскопа. Современные типы микроскопов. Объективы, окуляры и осветительные устройства микроскопов.

Тема 11. Оптические системы фото-кино-телеобъективов

Оптические системы фото-кино-телеобъективов, их классификация. Ограничение апертуры и поля зрения. Основные характеристики современных фотообъективов, типы приемников. Глубина резкости, разрешающая способность и качество изображения.

Тема 12. Зеркальные и зеркально-линзовые системы

Зеркальные классические системы: Кассегрена, Мерсенна, Грегори. Зеркально-линзовые объективы и линзовые компенсаторы. Система Максудова. Современные объективы космической оптики.

Тема 13. Проекционные оптические системы

Проекционные оптические системы. Виды и особенности оптической проекции. Диаскопы и эпископы. Светотехнические характеристики. Типы проекционных объективов. Виды конденсоров, способы освещения. Габаритный расчет проекционной системы.

Тема 14. Системы стереоскопического видения

Системы стереоскопического видения. Общие принципы действия, параллакс линейный и угловой. Методы стереоскопической проекции. Стереоскопический проектор, стереоскопический микроскоп.

Тема 15. Оптические системы оптико-электронных и лазерных приборов

Оптические системы оптико-электронных и лазерных приборов. Объективы, конденсоры оптико-электронных систем. Требования к качеству изображения. Оптические лазерные системы для фокусировки и уменьшения расходимости лазерного излучения.

РАЗДЕЛ 3. КОМПЬЮТЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Тема 16. Элементы теории образования изображения

Приложение принципов волновой оптики: дифракционная теория оптического изображения, волновые aberrации. Факторы, определяющие структуру оптического изображения: дифракция и aberrации. Разрешающая способность оптических систем, критерии. Функция рассеяния точки и оптическая передаточная функция. Способы оценки качества изображения по дифракционному изображению точки, частотно-контрастной характеристике, геометрическим и волновым aberrациям. Оценка разрешающей способности по форме пограничной кривой.

Тема 17. Основы автоматизации расчета оптических систем

Основные математические модели оптических систем. Характеристики и параметры оптических систем (внешние и внутренние). Основные формулы для расчета лучей в применении к ПЭВМ. Типовые программы оптических расчетов на ПЭВМ. Компьютерный анализ aberrаций и качества изображения. Основные принципы оптимизации оптических систем.

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Примерный перечень тем практических занятий

1. Законы геометрической оптики. Задачи на отражение и преломление света.
2. Кардинальные элементы идеальной оптической системы. Определение положения и величины изображения. Построение изображений путем расчета хода лучей.
3. Вычисление хода параксиальных лучей. Расчет положения главных плоскостей в многокомпонентной системе с помощью нулевых лучей.
4. Расчет одиночных линз. Сферические зеркала с внутренним и наружным отражением.
5. Оптические клинья. Отражательные и разделительные призмы. Графоаналитический метод расчета призмных систем.
6. Определение положений зрачков в оптических системах. Нахождение виньетирующей диафрагмы и величины поля зрения.
7. Механический эквивалент света, коэффициенты видности, световой поток. Освещенность изображения. Светосила оптических систем.
8. Потери световой энергии в оптических системах. Поглощение и отражение света, просветление оптики. Определение коэффициента пропускания в оптических системах.
9. Аберрации оптических деталей: линз, зеркал, плоскопараллельных пластинок. Суммирование аберраций.
10. Габаритный расчет телескопических систем (Кеплера и Галилея). Подбор объективов и окуляров по каталогам. Расчет коллектива, как элемента, сопрягающего зрачки. Ограничение световых пучков в зрительной трубе.
11. Геометрический расчет микроскопа и линзы. Подбор объективов и окуляров. Расчет осветительной части микроскопа. Ограничение световых пучков в линзе и микроскопе.
12. Ограничение световых пучков в фотообъективе. Глубина резкости изображенного пространства. Разрешающая способность фотообъектива.
13. Расчет конденсора на минимум сферической аберрации. Геометрический расчет проекционных установок.
14. Разрешающая способность в зрительной трубе и микроскопе. Критерии разрешающей способности.

Примерный перечень тем лабораторных работ

1. Исследование оптических деталей: призм и линз.
2. Исследование aberrаций оптической детали.
3. Исследование глаза. Измерение рефракции очковых стекол.
4. Исследование микроскопа и бинокулярной лупы.
5. Компьютерное моделирование и расчет зрачков в оптических системах.
6. Исследование фотометрических характеристик нейтральных стекол. Измерение коэффициентов отражения оптических образцов.
7. Исследование эпископической и диаскопической проекционных систем.
8. Исследование разрешающей способности фотообъектива.
9. Исследование призм и клиньев на гониометре ГС-5.
10. Исследование телескопической системы.

Примерный перечень тем курсовых проектов

1. Расчет передающей телескопической системы по схеме Галилея.
2. Расчет микроскопа с бинокулярной насадкой.
3. Расчет микроскопа с призмной системой и коллектором.
4. Расчет зрительной трубы с внутренней фокусировкой.
5. Расчет микроскопа с оборачивающей системой.
6. Расчет фотографической системы.
7. Расчет панорамической зрительной трубы.
8. Расчет призмного монокуляра.
9. Расчет автоколлимационной зрительной трубы.
10. Расчет перископической зрительной трубы.
11. Расчет диаскопической проекционной системы.
12. Расчет призмного бинокля.
13. Расчет оптической системы световодной насадки.
14. Расчет визира с панкратической оборачивающей системой.
15. Расчет объектива телевизионной камеры.
16. Расчет зеркально-линзового объектива с компенсатором для оптико-электронного прибора.

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Образовательный стандарт Республики Беларусь ОС РБ 1-38 01 02-2008. «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы».
2. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И., Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1992.
3. Прикладная оптика под ред. А.С. Дубовика. – М.: Недра, 1982.
4. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Изд-во 3-е /Под ред. В.А. Панова. – Л.: Машиностроение, 1980.
5. Вычислительная оптика. Справочник./Под ред. Русинова М.М. – М.: Книжный дом «Либроком», 2009.
6. Андреев Л.Н., Грамматин А.П. и др. Сборник задач по теории оптических систем. – М.: Машиностроение, 1987.
7. Артюхина Н.К. Теория и расчет оптических систем. Учебное пособие для студентов приборостроительных специальностей учреждений, обеспечивающих получение высшего образования. В 2-х частях. Ч.1, Мн.: Мин. обр. РБ. БНТУ, 2004 (гриф Минвуза).
8. Артюхина Н.К., Марчик В.А. Компьютерное проектирование оптических систем. В 2-х ч. Ч 1. Анализ центрированных оптических систем. Учебно-методическое пособие для студентов. Мн.: Мин. обр. РБ. БНТУ , 2007 (гриф УМО).
9. Апенко М.И., Запрягаева Л.А., Свешникова И.С. Задачник по прикладной оптике. М.: Недра, 1987.
10. Пакет прикладных программ по расчету оптических систем «ОПАЛ».

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Чуриловский В.Н. Теория оптических приборов. – М.-Л., Машиностроение, 1966.
2. Родионов С.А. Автоматизация проектирования оптических систем. -Л.: Машиностроение, 1982.
3. Артюхина Н.К. и др. Методическое пособие по выполнению расчетно-графических работ. БПИ, 1985.
4. Турыгин И.А. Прикладная оптика. – М.: Машиностроение, ч. 1, 1965; ч. II, 1966.
5. Артюхина Н.К., Пашкевич С.А. Методическое пособие для решения задач по дисциплине «Теория оптических систем» для студентов специальности Т.06.01 – «Приборостроение». Мн: БПИ. 1996.
6. Проектирование оптических систем. Пер. с англ./Под ред. Р.Шенона, Дж.Байанта. М.:Мир, 1983.
7. Шрёдер, Г. Техническая оптика / Г. Шрёдер, Х. Трайбер. – М.: Техносфера, 2006.
8. основополагающие стандарты в области метрологического обеспечения. М.: Изд-во стандартов, 1981.

9. Артюхина Н.К., Марчик В.А. Компьютерное проектирование оптических систем. В 2-х ч. Ч 2. Оптимизация оптических систем. Учебно-методическое пособие для студентов. Мн.: Мин. обр. РБ. БНТУ, 2007 (гриф УМО).

Компьютерные программы, электронные учебно-методические пособия

1. Microcal™ Origin Version 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.

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 аберраций](#).

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 – [абберация](#), 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 – [абберация](#), которая приводит к нарушению подобия изображения предмету (искажению внеосевых прямых линий).

Дифракция света – отклонение движения света от лучевых траекторий, не связанное с преломлением или отражением.

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](#).

Задний фокус F' – точка на оптической оси в пространстве изображений, сопряженная с бесконечно удаленной осевой точкой предмета.

Задняя фокальная плоскость – плоскость, перпендикулярная оптической оси и проходящая через [задний фокус](#) ОС.

Закон Ламберта (закон косинусов) – плоская поверхность, имеющая одинаковую [яркость](#) по всем направлениям и излучающая свет, [сила](#) которого изменяется по закону косинуса.

Зрачковые канонические координаты ρ_x, ρ_y – 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.

Интерференция – явление, возникающее при сложении двух когерентных полей.

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

Канонические координаты на предмете и изображении η_x, η_y – безразмерные приведенные координаты, связанные с реальными через канонические единицы (отношения длин волн к входной или выходной [апертурам](#)).

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 τ – 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).

Лучевая (световая) трубка – окрестность [реального луча](#), в пределах которой [световой поток](#) постоянный (представляется в виде трубки, состоящей из бесконечно узкого пучка лучей, ограниченного бесконечно малыми площадками на входе и выходе).

М

Меридиональная плоскость – любая плоскость, проходящая через [оптическую ось](#) и содержащая луч.

Монохроматические абберации – [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](#).

Некогерентное поле – поле, для которого разность фаз меняется случайным образом много раз за время регистрации.

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 зрачков – положение входного (выходного) зрачка, имеющее 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 $n_1 - n_2$ – 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 $n|$ – 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 плотность среды – логарифм величины, обратной пропусканию.

Оптическая поверхность – гладкая регулярная поверхность точно известной формы.

Оптическая сила $\Phi, [дптр]$ – величина, обратная приведенному заднему фокусному расстоянию.

Оптическая система – совокупность оптических сред, разделенных оптическими поверхностями, содержащая диафрагмы, предназначенная для формирования изображения путем перераспределения электромагнитного поля, исходящего от предмета.

Оптические среда – прозрачная однородная среда с точно известным значением показателя преломления и дисперсией.

Освещенность E , [лк] – поверхностная плотность потока энергии, падающего на поверхность.

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 l – 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.

Поверхностная плотность потока энергии – это величина потока, приходящегося на единицу площади.

Показатель преломления среды по отношению к вакууму n – 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.

Полное внутреннее отражение – явление, при котором свет, идущий из оптически более плотной среды в менее плотную, полностью отражается обратно (угол падения в более плотной среде больше некоторого предельного значения).

Положение главных плоскостей S_H, S'_H – расстояние от первой (последней) поверхности оптической системы до передней (задней) главной плоскости.

Поперечные аберрации – 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 аберрация – 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.

Реальная оптическая система – ОС, имеющая конечные поперечные размеры, нарушающая гомоцентричность пучков.

Реальные зрачковые координаты – обобщенные координаты луча на зрачке (размерность этих координат зависит от типа предмета или 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.

Референтная сфера – волновой фронт идеального пучка с центром кривизны в точке идеального изображения, проходящий через центр выходного зрачка.

Референтное поле – поле, которое имеет известную фазовую картину.

С

Сагиттальная плоскость – плоскость, содержащая главный луч пучка и перпендикулярная меридиональной плоскости (может быть ломаной и рассматриваться по частям).

Световая экспозиция – величина энергии, приходящейся на единицу площади за некоторое время (освещенность, накопленная за определенное время).

Световое поле – электромагнитное поле в оптическом диапазоне частот.

Светимость – поверхностная плотность потока энергии, излучаемой поверхностью.

Сила излучения (энергетическая сила света) – поток излучения, приходящийся на единицу телесного угла, в пределах которого он распространяется.

Сила света \mathcal{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.

Спектральная плотность пропускания – функция распределения [коэффициента пропускания](#) по спектру излучения.

Средний квадрат деформации (среднеквадратическое отклонение) волнового фронта (СКВ) $W_{СКВ}$ – квадратный корень из [дисперсии волновой aberrации](#).

Суперапохромат – оптическая система, в которой [вторичный хроматизм положения](#) исправлен для нескольких зон.

Сферическая aberrация – [aberrация](#), при которой все лучи, выходящие из осевой точки предмета, не пересекаются в одной осевой точке изображения; пучок остается радиально симметричным.

Сферические волны – волны, которые имеют [волновые фронты](#) в виде концентрических сфер.

Сферохроматизм – разность [сферической aberrации](#) для дополнительных длин волн.

Т

Телесный угол – участок пространства, ограниченный конусом.

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.

Уравнения Максвелла – уравнения, описывающие [электромагнитное поле](#) в векторном виде.

Ф

Формулы Френеля – формулы, связывающие амплитуды падающей, прошедшей и отраженной волн.

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 абберации – 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 аббераций (показывает влияние малых аббераций в ФРТ).

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.

Электромагнитное поле – переменное во времени электрическое и магнитное возмущение.

Энергетическая освещенность (облученность) – [поверхностная плотность потока энергии](#), падающего на поверхность.

Энергетическая светимость – [поверхностная плотность потока энергии](#), излучаемой поверхностью.

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.

Я

Яркость – величина [потока](#), излучаемого единицей площади в единицу [телесного угла](#) в данном направлении.