

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Лазерная техника и технология»

Н. К. Артюхина

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебно-методическое пособие
по дисциплине «Теория и расчет оптических систем»
для студентов специальности 1-38 01 02
«Оптико-электронные и лазерные приборы и системы»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
по образованию в области приборостроения*

Минск
БНТУ
2019

УДК 517.91
ББК 22.161.6
А86

Р е ц е н з е н т ы:

заведующий кафедрой электронной техники и технологии БГУИР,
канд. техн. наук, доцент *С. И. Мадвейко*;
начальник конструкторско-исследовательского отдела КПУ
«Пеленг-Оптик» ОАО «Пеленг», канд. техн. наук *А. М. Тареев*

Артюхина, Н. К.

А86 Лабораторный практикум : учебно-методическое пособие по дисциплине «Теория и расчет оптических систем» для студентов специальности 1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы» / Н. К. Артюхина. – Минск : БНТУ, 2019. – 82 с.
ISBN 978-985-583-480-0.

Учебно-методическое пособие «Лабораторный практикум» составлено с учетом учебного плана для студентов специальности 1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы».

Учебно-методическое пособие представлено как дидактический комплекс, состоящий из информационной, экспериментальной и контрольной частей. Такая структура способствует самостоятельной работе студентов в лаборатории.

В учебно-методическом пособии изложены основные теоретические положения дисциплины «Теория и расчет оптических систем»: понятия теории идеальной системы и основные принципы построения оптических систем (телескопической и проекционной систем, фотообъектива), компьютерного моделирования, элементной базы с выработкой общих и профессиональных компетенций, практических умений и навыков.

Издание может быть использовано в учебном процессе также при подготовке студентов и магистрантов родственных приборостроительных специальностей других вузов.

**УДК 517.91
ББК 22.161.6**

ISBN 978-985-583-480-0

© Артюхина Н. К., 2019
© Белорусский национальный
технический университет, 2019

ПРЕДИСЛОВИЕ

Теория и расчет оптических систем – прикладная оптическая наука, изучающая принципы конструирования оптических систем и методы образования изображения, и рассматривается как основная дисциплина, которая готовит специалистов оптического приборостроения по специальности 1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы», и закладывает теоретический фундамент специальных инженерных знаний.

Цель учебно-методического пособия – обеспечить формирование творческих процессов, активных методов и технологий познавательной деятельности, способствовать повышению эффективности обучения студентов на основе его индивидуализации.

Содержание учебно-методического пособия «Лабораторный практикум» включает темы, которые необходимо тщательно изучить: аберрации оптических систем; оптические детали (линзы и призмы, очковые стекла, светофильтры); оптические параметры – параксиальные характеристики, апертура, поле зрения; теоретические и практические положения по расчету и моделированию в компьютерной программе «Oral», широко применяемой на предприятиях оптического приборостроения.

В блоке контроля приведены вопросы для самостоятельной работы по темам дисциплины, примеры вариантов решения расчетных задач, примеры индивидуальных графических заданий и некоторых вариантов решений.

Представленное учебно-методическое пособие обеспечивает перспективность обучения с применением блока контроля.

Задняя фокальная плоскость объектива совмещена с передней фокальной плоскостью окуляра; оптическая сила такой системы равна нулю, а фокусное расстояние равно бесконечности, поэтому телескопическую систему называют также *афокальной*. Кроме объектива и окуляра, в систему может входить ряд других компонентов: оборачивающие системы, призмы, зеркала и т. п.

Основными оптическими характеристиками являются видимое увеличение Γ , угловое поле зрения 2ω , диаметр входного зрачка (D), диаметр выходного зрачка (D'), разрешающая способность (ψ), светосила (H).

Другими важными характеристиками являются: осевая длина системы, удаление выходного зрачка от задней главной плоскости a'_p (или от последней поверхности линзы S'_p) окуляра, коэффициент виньетирования k_ω .

Телескопическая система работает непосредственно с глазом наблюдателя. Для устранения напряжения аккомодации необходимо, чтобы изображение, создаваемое системой, находилось на бесконечности.

Числовая апертура: в пространстве предметов $A = n \cdot \sin|\sigma_A| = 0$ и в пространстве изображений $A' = n' \cdot \sin|\sigma_{A'}| = 0$ (равны нулю).

Для телескопической системы видимое Γ_T , линейное β , угловое γ и продольное α увеличения являются постоянными величинами, не зависящими от положения предмета, и связанными друг с другом следующими зависимостями:

$$\beta = \frac{n}{n'\Gamma_T} = \text{const}; \quad \gamma = \Gamma_T = \frac{\text{tg}\omega'}{\text{tg}\omega} = \text{const}; \quad \alpha = \frac{n}{n'\Gamma_T^2} = \text{const}. \quad (1.1)$$

Разрешающая способность телескопической системы – это наименьшее угловое расстояние между предметными точками, когда их изображения получаются раздельно, т. е. она определяется разрешающей способностью объектива. Из теории дифракции света, эта величина для визуальных систем равна:

$$\Psi = \left(\frac{140}{D} \right)'''. \quad (1.2)$$

Угловой предел разрешения, учитывающий разрешение глаза:

$$\Psi = \frac{60''}{\Gamma_T}. \quad (1.3)$$

Цель работы

1. Определить и рассчитать оптические характеристики двух зрительных труб: угол поля зрения 2ω ; видимое увеличение Γ ; положение и диаметры зрачков (D , D'); 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

Методика определения видимого увеличения. Видимое увеличение зрительной трубы определяется по линейному увеличению в плоскостях зрачков β_p (рис. 1.2).

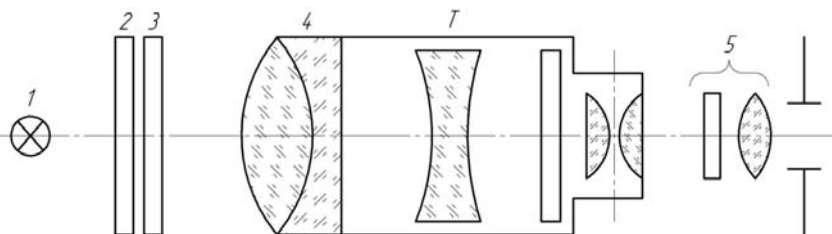


Рис. 1.2. Схема установки по определению видимого увеличения

Стеклянную масштабную шкалу 3 размещают вблизи объектива 4 испытуемой зрительной трубы T . 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, определяют 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 и удаления от наружного края выходного зрачка D' окуляра, лупу динаметра предварительно фиксируют 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' .

Определяется диаметр входного зрачка по формуле:

$$D = \Gamma D'.$$

Все измерения линейных величин следует повторить не менее трех раз; значения измеряемой величины брать как среднее арифметическое от результатов измерений.

Методика определения разрешающей способности. Разрешающую способность исследуемой зрительной трубы определяют на оптической скамье (рис. 1.3).

В фокальной плоскости объектива коллиматора устанавливают штриховую миру. Проверяемую зрительную трубу 2 располагают между коллиматором 1 и дополнительной зрительной трубкой (на рис. 1.3 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, перефокусировкой испытуемой системы добиваются резкого видения штрихов миры. По номеру разрешаемого элемента миры находят разрешающую способность проверяемой телескопической системы.

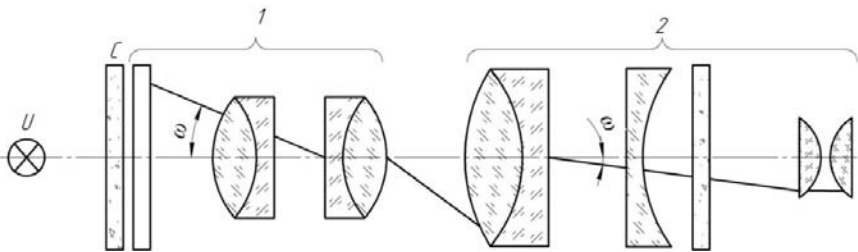


Рис. 1.3. Схема установки по определению разрешающей способности

Расчёт светосилы зрительной трубы H . Светосилой оптической системы H называется отношение освещенности изображения, создаваемого данной системой, к яркости предмета.

Светосила зрительной трубы H рассчитывается по формуле:

$$H = gD'^2 = g(D/\Gamma)^2,$$

где $g = \pi / 4(n' / n)^2 \tau / f_{\Gamma}'^2$;

n' и n – показатели преломления оптических сред, в которых расположены предмет и изображение;

τ – коэффициент пропускания оптической системы;

f_{Γ}' – фокусное расстояние глаза или объектива, с которым применяется телескопическая система.

Формула применима при условии, что диаметр зрачка глаза превышает диаметр выходного зрачка телескопической системы. Приведенная формула справедлива при наблюдении предметов конечных размеров.

Содержание отчета по инструкции (приложение В).

Лабораторная работа № 2 Исследование эпископической и диаскопической проекционных систем

Краткие теоретические сведения

Оптические приборы, предназначенные для получения на экране изображения негативов, чертежей, рисунков и других предметов, освещенных источником света, называются проекционными. К ним относятся кинопроекторы, диаскопы, фотоувеличители, фототрансформаторы, проекционные микроскопы и контрольно-измерительные приборы, используемые в промышленности для контроля размеров мелких деталей.

Назначение, виды и основные характеристики проекционных систем.

Различают два вида проекции: *эпископическую* – построение изображения непрозрачного предмета лучами, отраженными от предмета; *диаскопическую* – построение изображения предмета лучами, проходящими сквозь предмет.

В оптическую систему проекционного прибора входят осветительная и проекционная часть, которые согласованы между собой с целью получения требуемой освещенности экрана при заданном увеличении изображения.

Основными оптическими характеристиками проекционных приборов являются: масштаб проекции (линейное увеличение объектива),

размер проецируемого предмета, освещенность изображения, проекционное расстояние.

Для обеспечения заданных характеристик необходимо определять требуемое значение фокусного расстояния проекционного объектива и его относительное отверстие, правильно выбрать схему и конструкцию осветительной системы, а также источник света.

Осветительная часть проекционной системы должна направить на экран возможно большую часть светового потока источника света. Применяют два варианта схем освещения предмета: изображение источника света строится конденсором на освещаемом предмете или конденсор проецирует источник света во входной зрачок проекционной части диаскопической схемы, а предмет расположен вблизи конденсора (рис. 1.4). Если яркость излучающей поверхности источника света равномерна, то применяют первый вариант освещения.

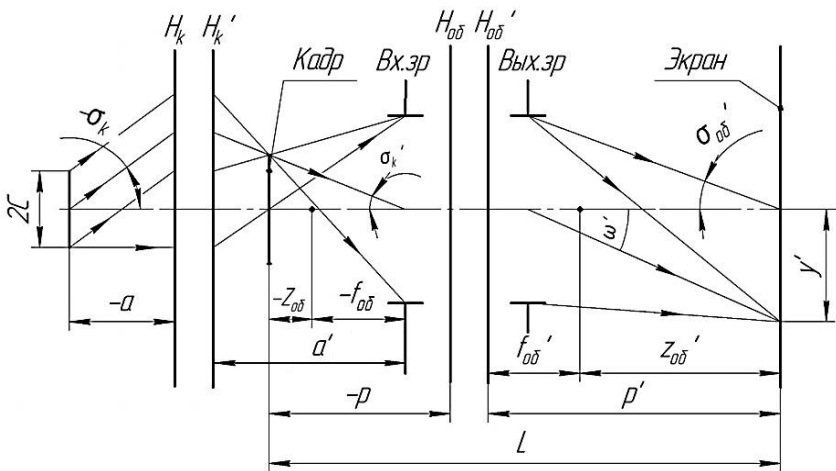


Рис. 1.4. Ход лучей в диaproекционной системе

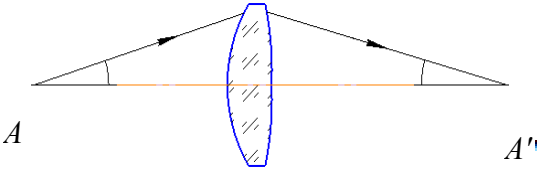
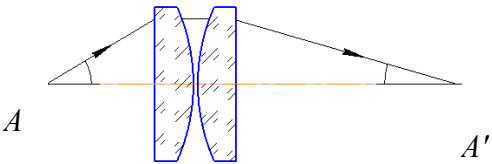
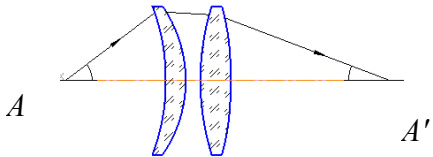
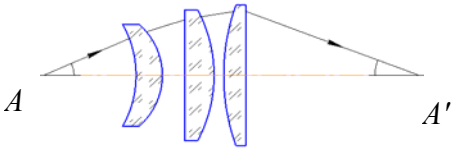
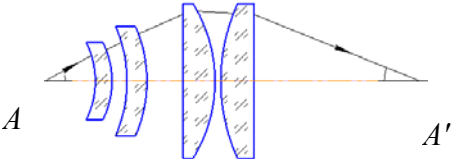
На практике применяют и промежуточные решения, когда изображение источника света располагается между проецируемым предметом и входным зрачком объектива.

Линзовые конденсоры. Конструкция конденсора определяется величиной суммы углов охвата (2σ) и сходимости ($2\sigma'$). Если сумма углов охвата и сходимости не превышает 40° , достаточно приме-

нять однолинзовый конденсор; при сумме углов до 60° – двухлинзовый, а до 100° – трехлинзовый (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Конструкции конденсоров

Угол охвата (2σ) и увеличения конденсора (β_k)	Тип конденсора
$2\sigma = 15^\circ - 20^\circ$ $\beta_k = -1^x$	
$2\sigma = 40^\circ - 45^\circ$ $\beta_k = -1^x - (-3^x)$	
$2\sigma = 40^\circ - 50^\circ$ $\beta_k = -4^x - (-10^x)$	
$2\sigma = 50^\circ - 70^\circ$ $\beta_k = -1,5^x - (5^x)$	
$2\sigma = 70^\circ - 100^\circ$ $\beta_k = -2^x - (6^x)$	

К конденсорам предъявляются следующие требования: исправление сферической аберрации, которая приводит к неполному заполнению зрачка светом и потере освещенности; соблюдение условия ортоскопии; соблюдение условия синусов.

Источники света (в проекционных приборах в качестве источников света применяются лампы накаливания, газоразрядные лампы и электрические дуги). Такие источники должны удовлетворять эксплуатационным требованиям (продолжительность срока службы, простота, безопасность обслуживания и т. п.), а также иметь необходимые светотехнические характеристики (достаточно высокую яркость накала; направленность излучения, т. е. концентрацию его в пределах угла охвата осветителя; спектральный состав излучения, обеспечивающий достаточную энергию в видимом диапазоне спектра; рациональную конфигурацию тела накала (размер и форма): прямоугольную – при проекции в плоскость кадрового окна, круглую – при проекции во входной зрачок объектива).

Проекционные объективы.

Требования к оптическим характеристикам:

1. Фокусное расстояние проекционного объектива f' должно обеспечивать необходимое увеличение (масштаб проекции) при заданном проекционном расстоянии p' от выходного зрачка объектива до плоскости экрана. Заднее фокусное расстояние:

$$f' = p' / (1 - \beta), \quad (1.4)$$

где линейное увеличение $\beta = b_k / B_3 = h_k / H_3$ (b_k, h_k, B_3, H_3 – соответственно размеры ширины и высоты кадра и экрана).

2. Дисторсия проекционных объективов не должна превышать 5 %, чтобы глаз не замечал нарушения геометрического подобия между оригиналом и его изображением на экране.

3. Разрешающая способность N объектива определяется разрешающей способностью глаза ($\psi_{\text{гл}} = 1' - 2'$) при заданном минимальном расстоянии положения наблюдателя от экрана l_n :

$$N \geq \beta / l_n \psi,$$

Расстояние l_n обусловлено размером поля резкого зрения глаза, которое составляет около 40° по горизонтали, т. е. $l_n > 1,5 B_3$.

4. Объектив должен быть достаточно светосильным, а его коэффициент пропускания достаточно высоким, чтобы обеспечить наибольшую освещенность экрана. Для получения равномерной освещенности экрана виньетирование наклонных световых пучков должно быть минимальным.

Светотехнические характеристики проекционных систем.

Коэффициент пропускания проекционного прибора:

$$\tau = \tau_0 \cdot \tau_n,$$

где τ_0 и τ_n – коэффициенты пропускания осветительной (конденсора) и проекционной части (объектива).

Вычисление коэффициента пропускания выполняется по формуле:

$$\tau = (1 - \alpha)^l (1 - \rho_1)^{n_1} (1 - \rho_2)^{n_2} R_3^{n_3} (1 - \rho_4)^{n_4}, \quad (1.5)$$

где α – коэффициент поглощения стекла;

l – длина пути световых лучей в стекле (в см);

n_1, n_2 – число поверхностей, граничащих с воздухом (просветленных однослойным и двухслойным покрытием и имеющих соответственно коэффициенты отражения $\rho_1 = 0,02, \rho_2 = 0,01$);

n_3 – число зеркальных поверхностей, коэффициент отражения которых $R_3 = 0,99$;

n_4 – число непросветленных поверхностей, граничащих с воздухом.

Полезный световой поток и освещенность на экране. Величина светового потока, падающего на экран при отсутствии проецируемого оригинала в кадровом окне, называется полезным световым потоком. Полезный световой поток определяет освещенность изображения на экране проекционного прибора.

Освещенность изображения, образуемого оптической системой в точке на оптической оси, вычисляется по формуле:

$$E'_0 = \pi \tau L \sin^2 \sigma', \quad (1.6)$$

где L – яркость источника света;

σ' – задний апертурный угол системы.

Для проекционных систем можно принять

$$\sin\sigma' = D' / (2f'(1 - \beta)),$$

где D' , f' и β – диаметр выходного зрачка, фокусное расстояние и линейное увеличение проекционного объектива.

Причем $D' = D$, т. к. обычно линейное увеличение в зрачках $\beta_p = 1$.

Освещенность по полю экрана, т. е. в точках вне оптической оси системы, определяется как:

$$E'_w = k_w E'_0 \cos^4 w', \quad (1.7)$$

где k_w – коэффициент виньетирования;

w' – угол поля зрения в пространстве изображения.

Если объектив имеет незначительное виньетирование наклонных пучков, а размеры экрана малы по сравнению с проекционным расстоянием, освещенность в пределах всей площади экрана будет оставаться неизменной ($\cos^4 w' = 1$). В этом случае полезный световой поток вычисляется по формуле:

$$F = E'_0 B_\vartheta H_\vartheta.$$

При неравномерном распределении освещенности по экрану в формулу вместо E'_0 подставляют $E'_{\text{ср}}$ – среднее арифметическое величин освещенностей, определенных в нескольких точках экрана.

Цель работы

Исследование принципа действия оптической системы эпидиаскопа; определение основных оптических характеристик объективов эпи- и диаканалов; описание оптической схемы объективов проекционного прибора и назначения оптических деталей, входящих в схему. Расчет оптических характеристик (увеличения, поля зрения, апертуры).

Оборудование и принадлежности к работе

Эпидиаскоп ЭПД 455, образцы, экран, каталоги объективов, библиотека компьютерного пакета «Орал», измерительные линейки.

Порядок работы и описание установки

Эпидиаскоп ЭПД-455 (рис. 1.5) предназначен для проецирования на экран методом эпи- или диапроекции оригиналов, выполненных на прозрачных и непрозрачных материалах (стеклянных или пленочных диапозитивов, чертежей, фотографий, рисунков и др.). Это комбинированный проекционный аппарат, оптическая схема которого сочетает схемы эпи- и диапроектора. Технические данные прибора приведены в табл. 1.2.

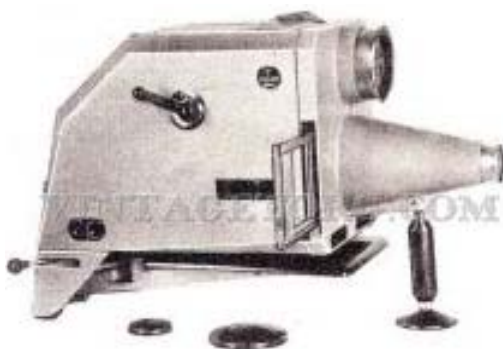


Рис. 1.5. Эпидиаскоп ЭПД 455

Эпидиаскоп имеет две отдельные проекционные системы и общий осветитель, в который входят проекционная лампа типа ПЖ 220–500 (220 В, 500 Вт), конденсорная линза и сферический отражатель. Система эпипроектора состоит из проекционного трехлинзового объектива и зеркала, система диапроектора – из проекционного четырехлинзового объектива и отдельной конденсорной линзы (рис. 1.6). Зеркало системы эпипроектора закреплено в оправе и может выниматься для чистки или замены. Блок осветителя установлен на перемещающемся кронштейне и переключается специальной рукояткой в режимы эпи- или диапроекции. Демонстрируе-

мые диапозитивы помещаются во вкладыши с кадровыми окнами разных размеров, устанавливаемые затем в кадровое окно диапроектора. Материалы, проецируемые методом эпипроекции, размещаются на откидывающемся предметном столе и выравниваются покровным стеклом. Правильность расположения проецируемого материала на предметном столе проверяется через смотровое окошко в боковой стенке эпидиаскопа. Расположение изображения на экране по высоте регулируется с помощью специальной опоры.

Таблица 1.2

Технические данные

	Эпипроектор	Диапроектор
Объектив	«Триплет»	«Индустар-51»
Фокусное расстояние, мм	365	210
Относительное отверстие	1 : 3,65	1 : 4,5
Увеличение, крат	7,3–15,5	12,1–26,3
Среднее значение освещенности экрана, лк	14	250
Максимальный размер проецируемых рисунков, мм	150 × 150	–
Величина перемещения стола, мм	50	–
Размер экрана, м	–	От 0,6 × 0,6 до 1,3 × 1,3
Расстояние от прибора до экрана, м	–	3–6
Пределы наклона эпидиаскопа в вертикальной плоскости, град	–	От 0 до 15 + 2
Габариты, мм	–	750 × 360 × 470
Масса, кг	–	25

Описание оптической схемы.

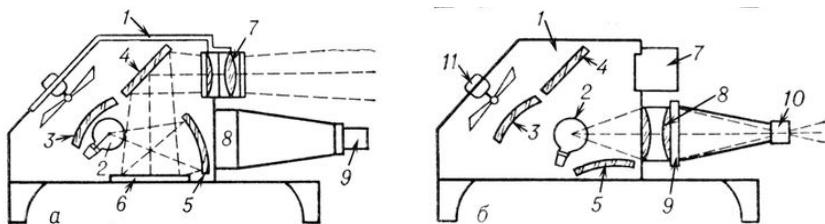


Рис. 1.6. Схема ЭПД 455 в режимах работы:

- 1 – кожух; 2 – источник света; 3 – сферическое зеркало;
- 4 – плоское зеркало; 5 – сферическое зеркало; 6 – непрозрачный оригинал;
- 7 – объектив эпипроектора; 8 – конденсор; 9 – рамка для диапозитива;
- 10 – объектив диапроектора; 11 – вентилятор

Составить оптическую схему проекционной установки эпи- и диаканалов, определить назначение каждой оптической детали, входящей в схему, эскиз схемы ЭПД 455 приведен на рис. 1.6.

Исследование проекционной системы эпиканала:

- 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;
- д) составить оптическую систему исследуемого эпиобъектива.

Исследование проекционной части диаканала:

- а) исследовать и выполнить чертеж оптической схемы 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 диапроекционного объектива.

Отчет выполняется по инструкции (приложение В). В отчете кроме таблицы измерений обязательно привести характеристики оптических схем проекционных объективов, используя для этого библиотеку программной среды «Oral».

Лабораторная работа № 3
Исследование оптики глаза.
Измерение рефракции очковых стекол

Краткие теоретические сведения

Строение глаза. Глаз, как оптическая система, преобразует энергию оптического излучения в зрительные ощущения. Глаз – шаровидное тело, покрытое непрозрачной оболочкой – склерой 10 (рис. 1.7).

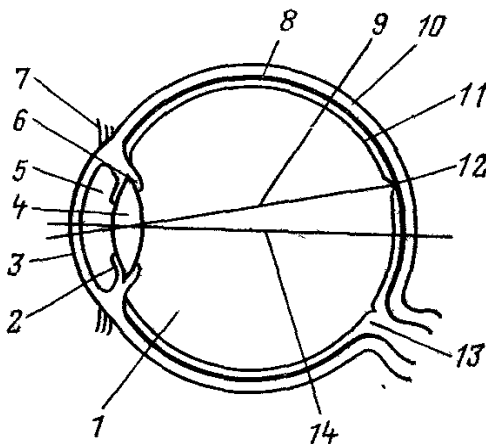


Рис. 1.7. Горизонтальный разрез правого глаза

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, представляющей собой светочувствительный слой. 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. Сетчатая оболочка – это сложное переплетение нервных клеток и нервных волокон,

соединяющих между собой глаз с корой головного мозга. Основными светочувствительными элементами (рецепторами) являются два вида клеток: палочки и колбочки. 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 центре желтого пятна находится *участок наиболее ясного видения*. Линия 9, проходящая через центр желтого пятна и заднюю угловую точку глаза, называется *зрительной осью*.

В зависимости от величины падающего светового потока 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 58–72 мм. При наблюдении близко расположенных предметов зрительные оси глаза образуют угол конвергенции (*тах* 32°). Диаметр всего глазного яблока – около 22–24 мм, масса – 7–8 г. Тонкая сосудистая пластинка (*радужная оболочка*) является диафрагмой, ограничивающей проходящий пучок лучей.

Характеристики глаза

Аккомодация – способность глаза приспособливаться к четкому различению предметов, расположенных на разных расстояниях от глаза.

Положение предмета, при котором создается резкое изображение на сетчатке для ненапряженного глаза, называют *дальней точкой* глаза; при наибольшем возможном напряжении глаза – *ближней точкой* глаза. При аккомодации глаза на бесконечность задний фокус совпадает с сетчаткой. Разность обратных величин расстояний между ближней и дальней точками глаза называют *объемом аккомодации глаза* (дптр).

Расстояние наилучшего зрения – это расстояние, на котором нормальный глаз испытывает наименьшее напряжение. Расстояние наилучшего зрения индивидуально (для нормального глаза при хорошем освещении 50 лк равно 250–300 мм).

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

Поле зрения глаза. Общее поле зрения громадно, больше, чем у какого-либо оптического прибора (125° – по вертикали и 150° – по горизонтали), но в действительности для ясного различения может быть использована часть поля зрения, определяемая областью жёлтого пятна ($6\text{--}8^\circ$).

Предел разрешения. Угол разрешения порядка $\Psi = 1'$ и зависит от многих факторов:

контраста предметов, от освещенности, от диаметра зрачка, от длины волны. Предел разрешения увеличивается при удалении изображения от центральной ямки и при наличии дефектов зрения.

Диаметр зрачка. В расчетах принимают $D = 1,5\text{--}2,5$ мм; улучшение разрешения только до $D = 3\text{--}4$ мм; далее сказываются аберрации глаза, и Ψ падает.

Острота зрения. S – способность глаза видеть раздельно два предмета, расположенных близко друг от друга.

$$S = \frac{1}{\Psi}. \quad (1.8)$$

Обычно $S = 0,5 \div 3$ (Ψ в угловых минутах).

3.1. 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

На рис. 1.8 изображение после 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 расхо-

мость 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 линзой, значения которой в диоптриях наносятся на шкалу, перемещаемую вместе с сеткой коллиматора, и отсчитываются по этой шкале.

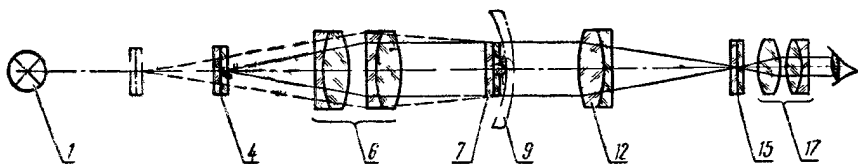


Рис. 1.8. Схема лучей в диоптриметре

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 фокальную плоскость, в которой помещены две пластинки 15, на одной из которых нанесено перекрестие, а на другой – круговая шкала. Изображение сетки коллиматора рассматривается через окуляр 17. 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.

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

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 снять 10 отсчетов и взять из них среднее арифметическое.

В зависимости от вида очковой линза приёмы измерения различны.

Измерение задней вершинной рефракции стигматических очковых линз. Установить очковую линзу. Перемещая её по агатовому стержню, привести изображение центральной точки точечной сетки на перекрестие сетки зрительной трубы (рис. 1.9). 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. 1.10).

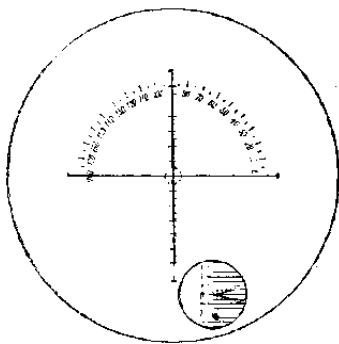


Рис. 1.9. Поле зрения окуляра зрительной трубы

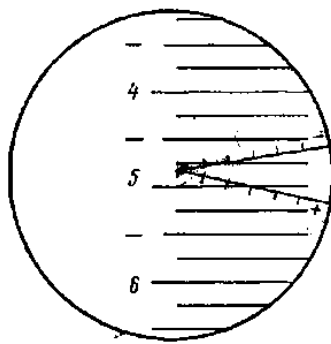


Рис. 1.10. Числовой отсчёт с нониусом

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 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 параллельные полосы перпендикулярны направлению ряда полос в первом главном сечении. Чем больше астигматическая разность данной линзы, тем более вытянутыми будут полосы.

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.

В отчёте обязательно представить результаты измерений рефракции и вычисленной погрешности измерений, а также результаты расчёта аметропии глаза, для которого предназначены исследуемые очковые линзы.

3.2. Исследование глазного дна

Цель работы

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

Оборудование и принадлежности к работе

Прибор «Офтальмоскоп ЭО-6».

Описание установки и порядок выполнения работы

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. Состав: насадка офтальмоскопическая; осветитель (волоконный жгут с двумя наконечниками); блок БМО (рис. 1.11). Для компенсации аметропии «врача» и «пациента» включить линзы 11 и 12 одновременно.

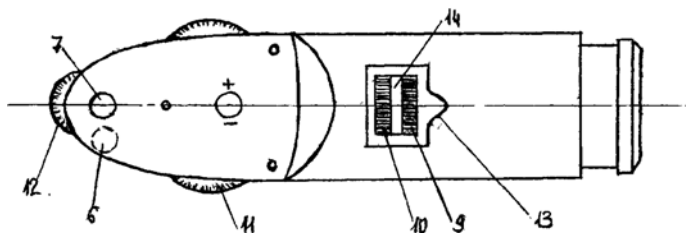


Рис. 1.11. Блок БМО

Рефракции включенных линз суммируются. Первоначально диски 11 и 12 установить таким образом, чтобы в окнах 6 и 7 появились цифры «0». 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. 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.

Отчет выполняется по инструкции (приложение В). В отчете кроме таблицы измерений обязательно привести характеристики и описание измеряемых образцов. Обработку результатов измерений представить с оценкой точности.

Лабораторная работа № 4
**Исследование фотометрических характеристик
нейтральных стекол. Измерение коэффициентов
отражения оптических образцов**

Краткие теоретические сведения

Коэффициент пропускания оптической системы. Потери энергии в ОС характеризуются коэффициентом пропускания τ , для определения которого необходимо знать коэффициенты отражения ρ от преломляющих поверхностей; число преломляющих поверхностей, граничащих с воздухом и другими средами; коэффициенты поглощения α_k оптических стекол; коэффициенты отражения ρ_z для отражающих покрытий, если в ОС имеются призмы и зеркала; длину хода луча d_k вдоль оптической оси в каждой оптической детали; типы светоделительных покрытий.

В приближенных вычислениях для поверхностей стекол с показателями преломления от 1,4 до 1,6 (кроны) можно принять $\rho_{кр} = 0,05$ для стекол с n свыше 1,6 (флинты) $\rho_{фл} = 0,06$; коэффициент поглощения для толщины стекла любой марки в 1 см $\alpha_1 = 0,01$. Если ОС не имеет просветляющих и светоделительных покрытий:

$$\tau = 0,95^{N_{кр}} \cdot 0,94^{N_{фл}} \cdot 0,99^d \cdot \rho^{N_z}. \quad (1.9)$$

где $N_{кр}$; $N_{фл}$ – число несклеенных поверхностей кронов (флинтов);

N_z – число зеркальных поверхностей;

d – суммарная толщина стекла в сантиметрах вдоль оптической оси.

Прохождение потока излучения через светофильтр. Светофильтр – оптическая деталь, служащая для изменения интенсивности или спектрального распределения потока излучения. Это обычно плоскопараллельная пластинка, выполненная из цветного стекла, пластмасс, желатины и других оптических материалов, включая жидкости и газы.

Цветное оптическое стекло (ГОСТ 9411-81): УФС, ФС, СС, СЗС, ЗС, ЖЗС, ЖС, ОС, КС, НКС, ПС, НС, ТС, БС. Название цветного стекла соответствует участку спектра, в котором коэффициент

пропускания $\tau(\lambda)$ имеет наибольшее значение. Светофильтры из нейтрального стекла (НС) почти равномерно ослабляют световой поток, из бесцветного (БС) – пропускают не только видимое излучение, но и УФ и ИК.

Спектральная характеристика светофильтра выражается значениями показателя поглощения $k(\lambda)$ для различных длин волн и спектральными кривыми оптической плотности, $D(\lambda)$ и коэффициента пропускания $\tau_\alpha(\lambda)$, которые связаны между собой следующей зависимостью:

$$D(\lambda) = -lg\tau_\alpha(\lambda) = k_\lambda d, \quad (1.10)$$

где k_λ – показатель поглощения (оптическая плотность для толщины стекла 1 мм);

d – толщина светофильтра, мм.

При учете потерь на отражение от двух поверхностей светофильтра общее значение коэффициента пропускания для данной длины волны определяется по формуле:

$$\tau(\lambda) = (1 - \rho)^2 \tau_\alpha(\lambda), \quad (1.11)$$

где ρ – коэффициент отражения от полированных поверхностей светофильтра.

Оптическая плотность светофильтра с учетом потерь на отражение:

$$D'(\lambda) = -lg\tau_\alpha(\lambda) - 2lg(1 - \rho) = D(\lambda) + D(\rho). \quad (1.12)$$

Интервал пропускания светофильтра определяют определенные длины волн $\lambda_{пр}$, для которых $\tau(\lambda)$ в два раза меньше τ_{max} . Для каждой марки цветного стекла определенной толщины известны: спектральные значения показателя поглощения k_λ , оптической плотности $D(\lambda)$ и спектральные кривые коэффициента пропускания $\tau(\lambda)$.

Цель работы

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

Оборудование и принадлежности к работе

Шаровой фотоэлектрический фотометр типа ФМШ-56М, КЮ-приспособления, набор светофильтров и образцов.

Порядок работы и описание установки

Описание установки. Фотометр 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 помещен светомерный шар (рис. 1.12).

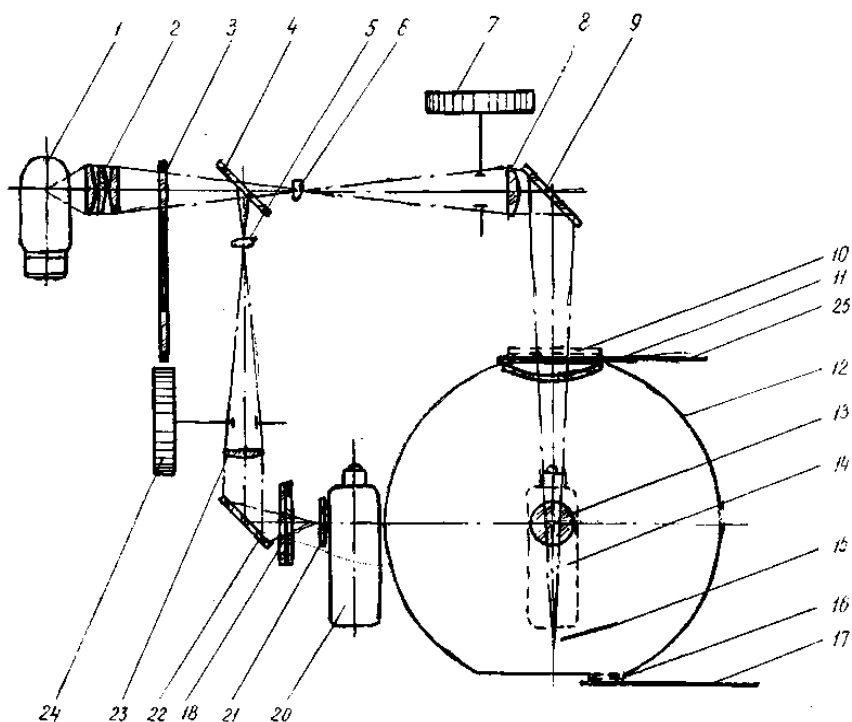


Рис. 1.12. Принципиальная схема фотометра

Свет лампы 1, пройдя конденсор 2, поглотитель 3 (табл. 1.3) и светоделительную пластинку 4, поступает 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. С помощью рукоятки наклоном зеркала 9 световой пучок, поступающий в шар, можно наводить на образец 16 или стенку шара. Образцы размещаются на столике 17. 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.

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 шар; световой поток, отраженный образцом и претерпевший многократное отражение от внутренней поверхности шара, создает на фотоэлементе освещенность пропорциональную коэффициенту отражения образца. Между образцом и приемным окном устанавливается экран, чтобы свет, отраженный от образца, не попал на фотоэлемент. Далее световой поток направляется на стенку шара,

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.

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 и измеряемый образец (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 ИД; 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 табл. 1.4.

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 $\tau_{\text{изм}}$ образца. Сравнить вычисленный $\tau_{\text{расч}}$ с измеренным $\tau_{\text{изм}}$.

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 ρ . Вычислить погрешности отсчетов.

Отчет выполняется по инструкции (приложение В). В отчете кроме таблицы измерений обязательно привести характеристики и описание измеряемых образцов. Обработку результатов измерений представить с оценкой точности.

Таблица 1.3.

Характеристики поглотителей

№ на диске	Маркировка	Длина волны пропускания, нм	Примечание
1	1	–	Корректирующий фильтр
2	2	364	Поглотители из цветного стекла
3	3	400	
4	4	457	
5	5	490	
6	6	540	

Таблица 1.4

Характеристики светофильтров

Марки светофильтра	НС1	НС2	НС3	НС7	НС8	НС9	НС11	НС12
Толщина светофильтра d , мм	3,0	3,2	3,0	3,4	2,8	3,2	3,2	3,1

Лабораторная работа № 5
Исследование aberrаций оптической детали

Краткие теоретические сведения

Монохроматические aberrации 3-го порядка

Сферическая aberrация – нарушение гомоцентричности в поле ОС широких пучков лучей, выходящих из осевой точки предмета. При наличии сферической aberrации лучи, проходящие через *край* выходного зрачка, образуют изображение в точке A' , а параксиальные лучи – в точке A'_0 (рис. 1.13).

Выходящий пучок лучей не гомоцентричен, но сохраняет симметрию своего строения. Длина отрезка A'_0A' является мерой продольной сферической aberrации для лучей, проходящих через край входного зрачка:

$$\Delta S'_{\text{кр}} = \Delta S' = S' - S'_0.$$

Изображение точки получается в виде кружка рассеяния, размер которого зависит от положения плоскости установки. Радиус кружка рассеяния в *плоскости Гаусса* определяет поперечную сферическую aberrацию $\Delta y' = \Delta S' \operatorname{tg} \sigma'_A$.

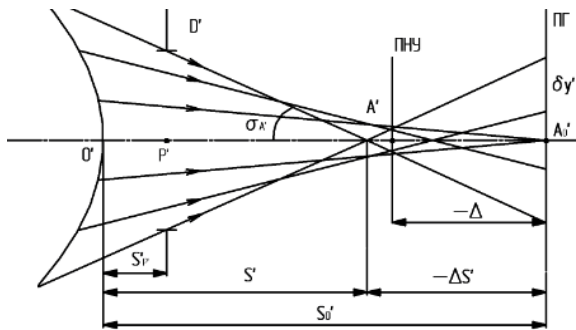
Кома – нарушение симметрии прошедшего через ОС широкого наклонного пучка лучей, выходящих из точек предмета, расположенных вне оптической оси системы (рис. 1.13, в).

Симметрия сохраняется относительно меридиональной плоскости, в которой кома вычисляется путем расчета хода реальных лучей по формуле

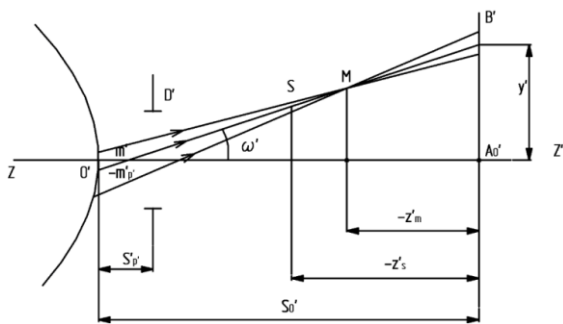
$$\Delta y'_K = \frac{y'_{m'} + y'_{-m'}}{2} - y'_{zl}, \quad (1.13)$$

где y'_{zl} – координата главного луча;

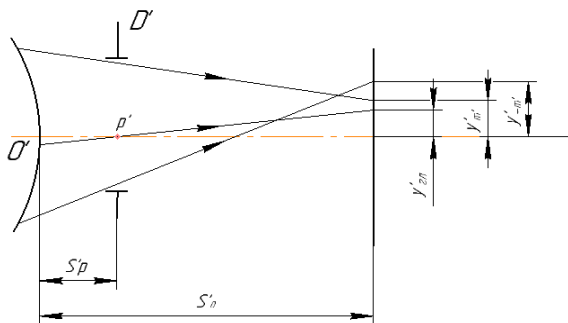
$y'_{m'}$, $y'_{-m'}$ – координаты лучей, проходящих через верхний и нижний край выходного зрачка на плоскости изображения.



a



б



в

Рис. 1.13 Ход лучей при наличии aberrаций:
a – сферической; *б* – астигматизма; *в* – комы

Астигматизм.

На рис. 1.13, б изображены в меридиональной плоскости: последняя поверхность системы с вершиной O' , выходной зрачок с центром P' ; показан ход трех лучей: главного ($m' = 0$) и двух наклонных с координатами на выходном зрачке (m' и $-m'$). Разность этих величин называется астигматической разностью или *астигматизмом*:

$$z'_S - z'_m = y^2 (s'_{P'} - S'_0)(D - C). \quad (1.14)$$

Формула (1.14) выражает продольную aberrацию.

Кривизна изображения. 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. Такая погрешность называется *кривизной изображения*.

Дисторсия – нарушение подобия между предметом и изображением вследствие непостоянства линейного увеличения для различных величин предмета. Весь пучок смещается на величину $\delta y'_D$, но его гомоцентричность не нарушается.

$$\delta y'_D = y^3 E. \quad (1.15)$$

Дисторсия вызывает искажение предмета, прямые линии могут искривляться. На рис. 1.14 приведены изображения квадрата при наличии дисторсии: подушкообразной (положительной) и бочкообразной.

Величина дисторсии оценивается в абсолютной и относительной мере. Абсолютная величина дисторсии определяется разностью $\Delta y' = y' - y'_0$, где y' и y'_0 – величины действительного и идеального изображений предмета y . Относительная величина дисторсии оценивается обычно в процентах:

$$\Delta = \frac{\Delta y'}{y'_0} \cdot 100 \%. \quad (1.16)$$

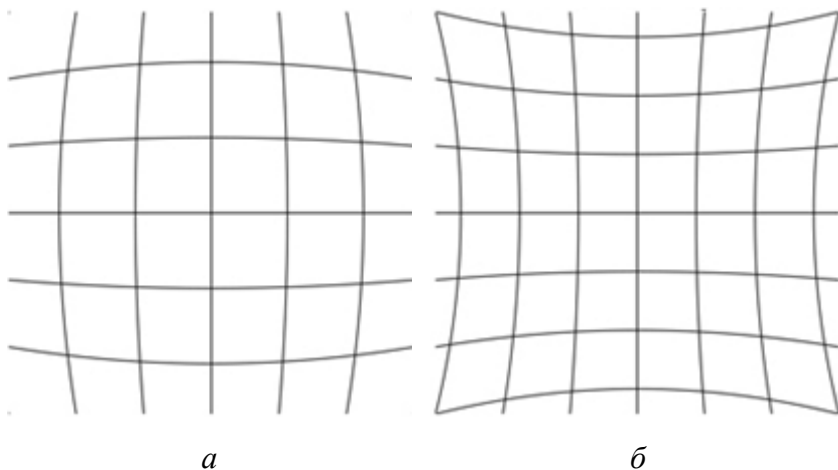


Рис. 1.14. Формы искажений при дисторсии:
 а – бочкообразная; б – подушкообразная

Хроматические aberrации 1-го порядка

Хроматизм положения: изображение предметной осевой точки вследствие дисперсии будет находиться на оптической оси, но на различных расстояниях S' от линзы для каждой длины волны (рис. 1.15).

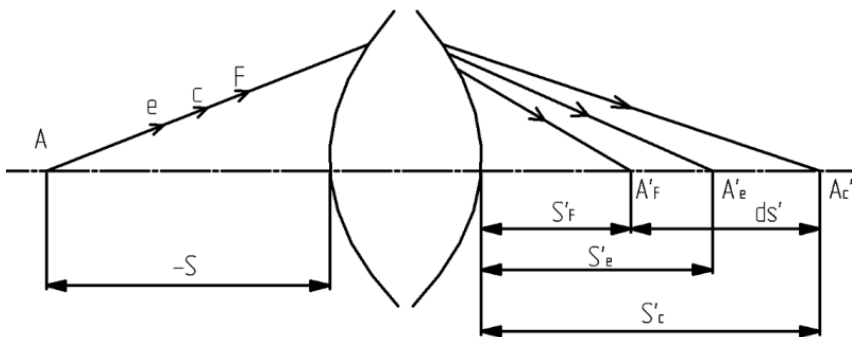


Рис. 1.15. Хроматизм положения

Хроматизм положения для видимой области спектра:

$$dS' = S'_F - S'_C.$$

В зависимости от плоскости установки имеем различную окраску в изображении точки. Для простой тонкой линзы хроматизм положения исправить невозможно. Хроматизм не зависит от формы линзы, а зависит от ее фокусного расстояния и коэффициента дисперсии. Для его исправления необходимо соединить одну положительную и одну отрицательную линзы из различных марок стекла.

Цель работы

Изучить основные aberrации простой линзы по виду фигуры рассеяния в плоскости изображения. Измерить сферическую aberrацию и хроматизм положения 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

Исследование сферической aberrации, комы и астигматизма по виду изображения светящейся точки. Работа производится на установке, изображенной на рис. 1.16.

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*, *e* и *F*. 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, определить примерный характер распределения энергии в этих фигурах;

д) исследовать изображение точки при наличии *aberrации астигматизма*. Для этого установить зональную диафрагму малого диаметра, получить изображение светящейся точки на экране 7 и отметить по шкале местоположение последнего. Затем повернуть линзу вокруг вертикальной оси на угол 20–30° и, перемещая экран по направлению к линзе, а затем – от линзы, зафиксировать постепенное изменение фигуры рассеяния изображения точки до превращения ее в резкую полосу. Отметить 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 отметить, что меридиональное и сагиттальное изображения светящейся точки находятся на различных расстояниях между собой и от линзы (проявление *aberrации кривизны поверхности изображения*). Показать относительное местоположение параксиального и астигматического изображений.

Исследование дисторсии. Установка схематически изображена на рис. 1.17, на котором обозначены: 1 – источник света; 2 – матовое стекло, на котором нарисованы три квадрата; 3, *a* и 3, *б* – диафрагмы, поочередно устанавливаемые в положении «*a*» и «*б*» перед линзой 4, изображающей матовое стекло на экране 5 за ней.

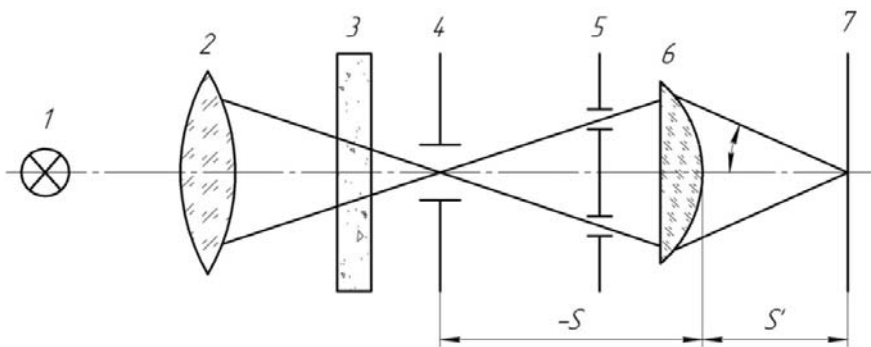


Рис. 1.16. Схема установки

- 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.

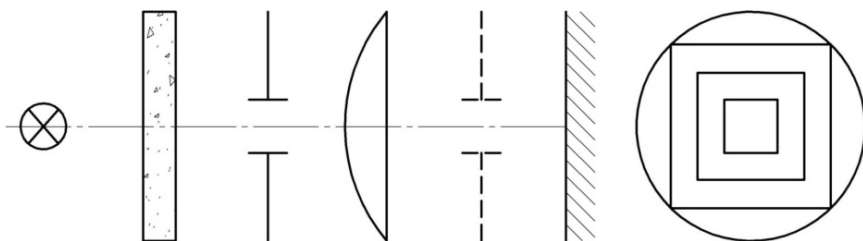


Рис. 1.17. Схема установки по исследованию дисторсии

Работу производить в следующей последовательности:

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

Отчет выполняется по инструкции (приложение В).

Лабораторная работа № 6
Исследование разрешающей способности фотообъектива

Краткие теоретические сведения

Разрешающая способность оптической системы определяется наименьшим расстоянием между двумя точками или линиями, видимыми раздельно через данную систему и оценивается для фотографического объектива в линейной мере.

Изображение точки идеальной ОС представляет собой дифракционную картину. Эта картина имеет вид центрального светлого пятна (диск Эри), окруженного системой дифракционных колец. Подавляющая часть (около 84 %) светового потока, проходящего через ОС, попадает в область центрального светового пятна. Интенсивность первого светлого кольца составляет 1,74 %, а второго 0,41 % от интенсивности центрального пятна. Угловое расстояние, Ψ_{\min} для первого темного кольца, определяется из формулы ($D \gg \lambda$).

$$\Psi_{\min} = (1,22 / D) \lambda, \quad (1.17)$$

где D – диаметр отверстия;

λ – длина волны света.

Критерий Рэля позволяет количественно определить разрешающую силу различных оптических приборов (телескопов, микроскопов, спектральных приборов и т. д.). Согласно критерию Рэля, изображения двух одинаковых точечных источников света считаются разрешимыми, если центральный максимум дифракционной картины от одного точечного источника совпадает с первым минимумом дифракционной картины от другого (рис. 1.18). Критерий основан на том, что при провале в распределении интенсивности изображения двух близких точек в 20 % эти точки будут восприниматься как раздельные.

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.

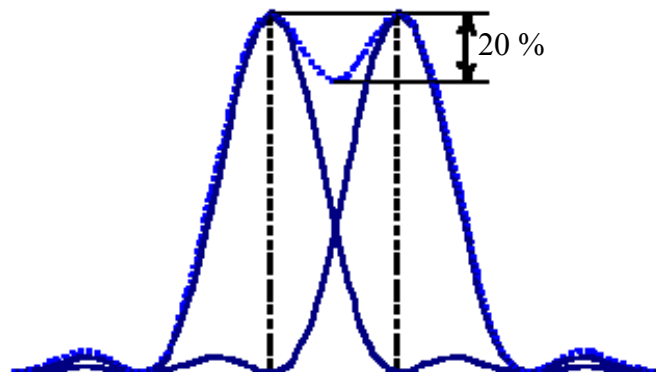


Рис. 1.18. Разрешение двух близких точек

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.

Наиболее просто разрешающую способность определять по таблицам и мирам, расположенным в фокальной плоскости объектива коллиматора. *Тест-объект* (мира) состоит из 25 элементов, в каждом из которых 4 квадрата с штрихами разной толщины (рис. 1.19). Поскольку разрешающая способность фотообъектива может зависеть от направления штрихов, в мире линии располагаются по четырем разным направлениям: вертикальные, горизонтальные и наклонные под углом 45° . Расстояние между штрихами от элемента к элементу убывает в геометрической прогрессии.

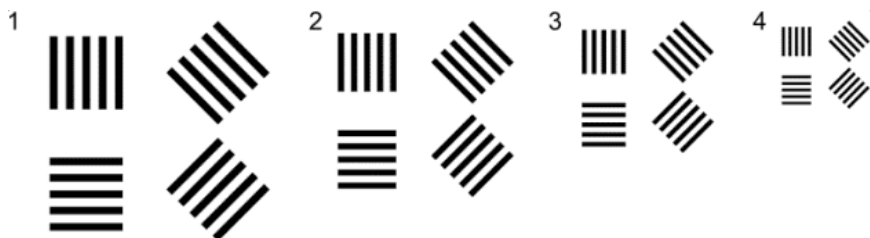


Рис. 1.19. Штриховые миры с номерами 1, 2, 3, 4

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

Схема установки для определения разрешающей силы объектива представлена на рис 1. 20.

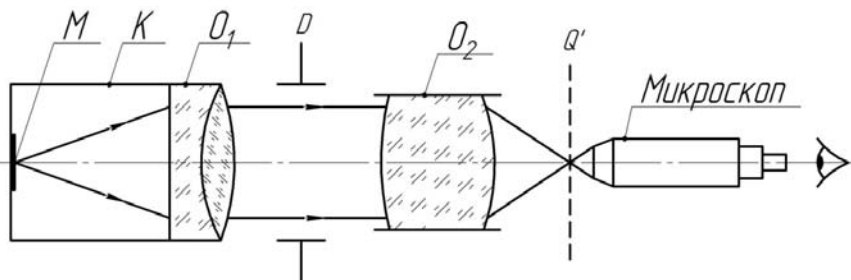


Рис. 1.20. Схема установки по определению разрешающей способности

В передней фокальной плоскости объектива O_1 коллиматора K помещается штриховая мира M . Изображение миры, даваемое объективом O_1 , находится 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 мира, находящееся в бесконечности, в свою заднюю фокальную плоскость Q . Угловое расстояние между изображением соседних штрихов мира равно:

$$\alpha = \frac{l_m}{f'_K},$$

где l_m – линейное расстояние между соседними штрихами мира;
 f'_K – фокусное расстояние коллиматора ($f'_K = 1600$ мм).

Угловой размер $\bar{\psi}$ изображений штрихов мира в плоскости \bar{Q} , равен также углу α .

Исследование зависимости разрешающей способности фотообъектива от диаметра входного зрачка:

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

Порядок выполнения работы

1. Для ряда значений диаметра входного зрачка D объектива определить соответствующие предельные разрешаемые группы штрихов для соответствующих мир.

2. Найти величины угловых ($\alpha = \bar{\psi}$) расстояний между штрихами мира, используя данные табл. 1.6. По номеру и элементу мира, все направления штрихов которого разрешаются, находим соответствующий ему угол разрешения (в угловых секундах).

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 в мм^{-1} :

$$\bar{N} = \frac{1}{\bar{\Delta}}.$$

5. Вычислить величину N для соответствующих значений D .

Отчет выполняется по инструкции (приложение В).

В отчете кроме таблицы измерений обязательно привести характеристики и описание испытуемых объективов. Обработку результатов измерений представить с оценкой точности. Составить таблицы результатов измерений эксперимента и результаты расчета линейной и угловой разрешающей способности (табл. 1.5).

Таблица 1.5

Результаты измерений и расчетов

D / f'	1 : 2	1 : 2,8	1 : 4	1 : 5,6	1,8
$D, \text{мм}$					
Ψ					
$\bar{\Delta}, \text{мм}$					
$\bar{N}, \text{мм}^{-1}$					
$N, \text{мм}^{-1}$					

Привести графики зависимостей разрешающей способности от диаметра входного зрачка $N(D)$ и $\bar{N}(D)$. В заключении дать сравнительный анализ N объектива для различных значений D .

Таблица 1.6

Угол разрешения в угловых секундах по номеру мира

Квадрат	Мира 1	Мира 2	Мира 3	Мира 4	Мира 5
1	2,68	5,16	10,3	20,6	41,3
2	2,43	4,86	9,73	19,5	38,9
3	2,30	4,6	9,20	18,4	36,8
4	2,17	4,33	8,66	17,3	34,7
5	2,05	4,09	8,16	16,4	32,7
6	1,91	3,82	7,64	15,3	30,6
7	1,84	3,68	3,36	14,7	29,5
8	1,72	3,44	6,88	13,8	27,5
9	1,61	3,22	6,45	12,9	25,8
10	1,52	3,03	6,06	12,1	24,3
11	1,43	2,86	5,73	11,5	22,9
12	1,36	2,71	5,42	10,9	21,7
13	1,29	2,58	5,16	10,3	20,6
14	1,21	2,42	4,84	9,68	19,4
15	1,14	2,28	4,56	9,13	18,3
16	1,07	2,15	4,30	8,59	17,2
17	1,02	2,03	4,06	8,12	16,2
18	0,96	1,92	3,84	7,67	15,3
19	0,92	1,84	3,68	7,37	14,7
20	0,85	1,71	3,41	6,83	13,7
21	0,81	1,61	3,22	6,45	12,9
22	0,76	1,52	3,03	6,07	12,1
23	0,72	1,43	2,86	5,73	11,5
24	0,68	1,36	2,71	5,43	10,9
25	0,64	1,29	2,58	5,16	10,3

2. РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ЭЛЕМЕНТОВ

Лабораторная работа № 7 Исследование призм и линз

Краткие теоретические сведения

Оптические линзы

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 деформацию 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 ГОСТ 2.412-81 «Правила выполнения чертежей и схем оптических изделий».

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 для линз различного назначения приведены в табл. 2.1. При выборе допусков следует учитывать: возможности стекловаренных заводов по пузырьности (табл. 12, 13–16 из ГОСТ 3514-94 «Стекло оптическое бесцветное»). Точность изготовления рабочих поверхностей регламентируется допусками N , ΔN и ΔR .

В табл. 2.2 приведены среднеопытные нормы этих допусков для линз различного назначения. Там же даны величины допусков на децентрировку линз и допуски на толщину линзы Δd по оси. Необходимо, чтобы допуски на толщину 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. Рекомендации по выбору этих допусков приведены в ОСТ 3-2124-74 «Соединение круглых оптических деталей с оправками».

Классы шероховатости указаны в ГОСТ 2.309-81 и выбираются: для рабочих поверхностей линзы 0,05 (полировка); для базовых поверхностей 2,5.

Классы чистоты рабочих поверхностей регламентируются в ГОСТ 11141-84 «Классы чистоты поверхностей оптических деталей».

Покрyтия линз. Рабочие поверхности линз часто подвергают просветлению или защите; иногда на них наносят зеркальные покрытия. На практике применяют следующие виды просветления (для уменьшения потерь света при отражении на полированных поверхностях): 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; 44Р43Р; (используют в спектральных приборах из-за малой избирательности по коэффициенту отражения).

Боковые (базовые) поверхности покрываются черной эмалевой краской. Рекомендуют к применению эмаль ХС-75УГМ по ТУ 6-10-2136-88 черного цвета.

Сведения о покрытиях приведены в стандартах:

ОСТ 3-490-83 «Линзы оптические»,

ОСТ 3-1901-85 «Покрyтия оптических деталей».

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 раздельного крепления, подвержена расстройству при работе и требует тщательной юстировки при сборке;

– крепление призмы в оправках 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 различных справочниках

Расчетные размеры призм обычно увеличивают на 0,5–2 мм для обеспечения юстировки и крепления призм в оправках. Указанный припуск берется меньше, когда призма закреплена в гнезде, и больше при креплении в отдельной оправке.

Фаски на призмах от выколок нормализованы (ОСТ 3-1825-73 «Детали оптические. Фаски»). Они снимаются по нормали к биссектрисе угла между гранями, ширина фасок измеряется по наибольшей стороне прямоугольника. На ребре призм снимается фаска шириной 0,02–0,05 мм (она является источником потерь света).

Покрyтия призм. Рекомендуется просветлять преломляющие грани призм (просветление 24И 300° по ОСТ 3-1901-85). Зеркальные покрытия на отражающих гранях призм предохраняются от разрушения с помощью нанесения на них тонкого слоя меди электролитическим методом и затем еще слоя лака. Пример обозначения: зеркальн. 8И.3И.72П по ОСТ 3-1901-85, $\lambda = 500 \pm 20$ нм.

Матовые поверхности покрываются эмалью черного цвета.

Допуски на изготовление призм. Рекомендации по выбору допусков к материалу призм изложены в табл. 2.1.

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. 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 табл. 2.2. Классы чистоты оптических поверхностей выбираются по рекомендациям, изложенным в ГОСТ 11141-84.

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.

Цель работы

Исследование конструктивных элементов линз и призм; приобретение навыков по работе со справочниками, государственными и отраслевыми стандартами.

Оборудование и принадлежности к работе

Исследуемые детали, штангенциркули, измерители, весы, справочники, отраслевые и государственные стандарты.

Порядок работы

Линзы:

1. Определить типы линз.
2. Ознакомиться с рекомендациями стандартов.
3. Определить конструктивные размеры путем обмера линз и использованием стандартов: ОСТ 3-2124-74; ОСТ 3-490-83; ГОСТ 6636-69 «Нормальные линейные размеры».
4. Определить расчетные размеры линз; радиусы, рассчитанные по стрелке прогиба линз, привести в соответствие со стандартом ГОСТ 1807-75 «Радиусы оптических поверхностей».
5. Считая линзы центрирующими, определить поле допуска, исходя из назначения линз (см. ОСТ 3-2124-74).
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 $P_3 = (1,5 \div 2) \cdot P$ детали, исходя из веса линзы.
8. Рассчитать допуски; сравнить с рекомендуемыми по табл. 2.1 и 2.2 и проанализировать значения.
9. Рассчитать f' , S_F , $S'_{F'}$ (на задний фокальный отрезок задать допуск ± 1 % от фокусного расстояния f).

10. Выполнить чертежи линз с заполнением таблиц по ГОСТ 2.412-81. Образцы чертежей линз находятся в приложении.

Призмы:

1. Исследовать конструкцию призм. Определить тип, обозначение.
2. Ознакомиться с рекомендациями стандартов.
3. Определить конструктивные размеры призм путем обмера и использованием стандарта ОСТ 3-1825-73. Измеренные величины округляются до нормальных по ГОСТ 6636-69.

4. Выбрать просветляющее покрытие и установить тип черной матовой эмали.

5. Назначить допуски к материалу и изготовлению призмы по табл. 2.1 и 2.2.

6. Рассчитать допуски к изготовлению и проанализировать их значения.

7. Выполнить чертежи призм с заполнением таблиц по ГОСТ 2.412-81. Образец чертежа призмы находится в приложении.

Отчет выполняется по инструкции (приложение В). В отчете привести описание типа заданных линз и призм, их основных параметров. Дать обоснование выбора допусков к материалу и изготовлению оптических деталей, и типа покрытий, а также результаты обмера линз и расчета допусков. Кроме расчета требуемых характеристик привести выполненные чертежи линз и призм.

Таблица 2.1

Допуски на характеристики стекла (ГОСТ 3514-94)

Наименование	Категории и классы стекла (допуски)						
	Δn_e	$\Delta(n_F - n_C)$	Оптич. одно-род.	Двойн. лучепр.	Показ. ослаб.	Бесвильность	Пузыр зырность
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

Наименование	Категории и классы стекла (допуски)						
	Δn_e	$\Delta(n_F - n_C)$	Оптич. одно-род.	Двойн. лу-чепр.	Показ. ослаб.	Бе-свиль-ность	Пузыр зыр-ность
Фотообъективы: – аэрофотосъемка; – репродукционные; – обычные	2Б 2Б–3В 3В	2В 2Б–3В 3В	2–3 2–3 3	2 1–2 2–3	5–6 5–6 6	1Б 1Б 1Б	4Г,5Д 4Г,5Д 5Д,6Е
Микрообъективы – до $10^X \times 0,25$ – от $10^X \times 0,25$ – $40^X \times 0,65$ и выше	3В 2Б 2Б	3В 2В 2В	2–3 1–2 1–2	2–3 1–2 1–2	7 6 5	2Б 1Б 1Б	3Г,4Д 2Г 1Б,2Г
Линзы окуляров	4Г	4г	2–4	2–3	6–7	2Б	2Г
Призмы: – рефрактометрические, спектральные; – отражательные	4Г 5Г	3Б 5Г	1 1–3	1 2	3–5 3–4	1А 1А,2А	3Г–4Д 2Б–5Д

Таблица 2.2

Допуски на расчетные размеры линз и призм

Назначения линз и призм	N	ΔN	Класс пробного стекла ΔR	Допуск на толщину мм \pm	Допуск на центрировку мм \pm
Объективы, телескопические системы	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 – обычные	1–2 2–3	0,1–0,2 0,2–0,5	1–2 2–3	0,01–0,03 0,05–0,3	0,005–0,2 0,005–0,2
Микрообъективы – до $10^X \times 0,25$ – от $10^X \times 0,25$ – до $40^X \times 0,65$ – от $40^X \times 0,65$ и выше	2–3 1–2 0,5–1,0	0,2–0,5 0,1–0,2 0,05–0,1	2–3 1–2 1	0,01–0,05 0,01–0,05 0,01–0,05	0,003–0,005 0,003–0,005 0,003–0,005

Окончание табл. 2.2

Назначения линз и призм	N	ΔN	Класс пробного стекла ΔR	Допуск на толщину мм \pm	Допуск на центрировку мм \pm
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 2.3.

Назначение линз (варианты)

№	Назначение линзы	Размещение в приборе	Материал линзы	Характеристики прибора	Условия работы прибора
1	Линза анаморфотная	Внутри прибора	СТК 3	–	Работа в помещении
2	Линза аэрофотообъектива	Одна поверхность наружная	ТК 16	$f' = 250$ мм; 1:2; $2\omega = 40^\circ$	Динамический режим с перепадом t°
3	Линза конденсора	Внутри прибора	К8	$f' = 30$ мм; $A = 0,6$; $V = 4^x$	Лабораторный режим до $+50^\circ$ С.
4	Линза-коллектор	Наружная линза	К19	$f' = 20$ мм; $A = 0,3$	Нормальный режим $+ 20^\circ$ С.
5	Линза микрообъектива	Внутри прибора	К14	$f' = 20$ мм; $A = 0,14$	Нормальный режим $+ 20^\circ$ С.
6	Линза-отражатель	Наружная линза	ЛК7	–	Повышенный тепловой режим
7	Линза проекционного объектива	Внутри прибора	ТК2	$f' = 40$ мм; $V = 6^x$; $A = 0,2$	Нормальный режим $+ 20^\circ$ С.
8	Линза для подсветки шкалы	Внутри прибора	К8	–	Нормальный режим $+ 20^\circ$ С.
9	Оборачивающая линза	Внутри прибора	КФ4	$V = 0,5^x$; $f' = 10$ мм	Динамический режим с перепадом t°

Таблица 2.4

Назначение призм (варианты)

№	Назначение призмы	Размещение в приборе	Материал призмы
1	Компенсация вращения изображения	Перед объективом	БК10
2	Окулярная призма	Перед окуляром	К8
3	Окулярная призма	Вблизи плоскости изображения	БК10
4	Для излома оптической оси	После объектива	К8
5	Для раздвижки баз бинокулярного прибора	Перед окуляром	БК10
6	Излом оптической оси	После объектива	К8
7	Отклонение оси на 90°	После объектива	К8
8	Смещение оси	Перед объективом	БК10
9	Компенсация вращения изображения	Перед объективом	К8
10	Окулярная призма	Вблизи плоскости изображения	К8
11	Для излома оптической оси	После объектива	БК10
12	Окулярная призма	Вблизи плоскости изображения	К8

Лабораторная работа № 8

Компьютерное моделирование и расчет параксиальных характеристик и аберраций третьего порядка склеенного двухлинзового объектива

Цель работы

Усвоение теоретического материала и приобретение практических навыков при расчете ОС в параксиальной области. Ознакомление с пакетом прикладных программ (ППП) «Орал» для выполнения оптических расчетов. Компьютерный расчет параксиальных характеристик, составление объектного модуля ОС, расчет сумм Зейделя, определение габаритов системы. Сравнительный анализ расчета кардинальных элементов (компьютерным и расчетно-графическим способом).

Оборудование и принадлежности к работе

Персональный компьютер, программный пакет по расчету оптических систем «Орал», электронный ключ защиты.

8.1. Компьютерное моделирование

Краткие теоретические сведения

Задача анализа оптической системы (ОС) состоит в определении внутренних и внешних характеристик по известным значениям конструктивных параметров.

Гауссовы (параксиальные) характеристики

F – переднее фокусное расстояние в мм;

F' – заднее фокусное расстояние в мм;

S_F – передний фокальный отрезок в мм;

S'_F – задний фокальный отрезок в мм;

S_H – расстояние от вершины первой поверхности до передней главной точки (мм);

S'_H – расстояние от вершины последней поверхности до задней главной точки (мм);

S – передний отрезок (мм от первой поверхности или дптр от входного зрачка);

S' – рабочий задний отрезок (мм или дптр), показывающий положение реальной плоскости установки (плоскость регистрации изображения);

S'_g – задний отрезок (мм или дптр), показывающий положение изображения, сопряженного с предметом;

V – обобщенное увеличение (в парапаксиальной области – это отношение обобщенной величины изображения (мм, радианы) к обобщенной величине предмета).

Величина изображения определяется в плоскости установки (см. отрезок S').

$S_p (S'_p)$ – положение входного (выходного) зрачка. Для удаленного предмета (изображения) положение входного (выходного) зрачка отсчитывается в мм от первой (последней) поверхности ОС. Для близкого предмета (изображения) положение входного (выходного) зрачка в диоптриях от предмета (изображения).

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 или апертурой областей на АД для каждого пучка. Просмотр габаритов пучков возможен в графической и табличной форме. В табличной форме для всех пучков выводятся следующие оптические характеристики.

Передняя (задняя) апертура – показывает полуразмеры пучка на входе (выходе) ОС в сечениях X и Y , выраженных в обобщенных зрачковых координатах (для удаленного предмета или изображения в мм, для близкого – произведение показателя 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 для осевого пучка основной длины волны (на выходе для близкого расстояния это функция освещенности изображения, а для дальнего – сила света).

Характеристики главных лучей пучков описываются координатами точек поля.

В табличной форме приводятся величина предмета (изображения) в мм или угловой мере, а также относительная величина – отношение величины предмета (изображения) данного пучка к максимальным размерам поля;

Определяются координаты габаритных лучей пучков, максимальные световые высоты на поверхностях, «стрелки» прогиба по этим высотам, а также координаты главного, верхнего и нижнего меридиональных и бокового (сагиттального) лучей.

Особые ситуации: Н – непопадание; О – полное внутреннее отражение; К – острый край; Г – прохождение за габаритами.

Рисунок оптической системы выводится в графическом режиме. При этом возможно выделение фрагмента рисунка с помощью клавиш: «SPASE» (F4 – параметры текущей поверхности; F6 – из выделенного фрагмента возврат на полный рисунок).

Задание поверхности изображения. Характеристики можно вычислять либо при номинальном положении, либо при заданном смещении (в мм или дптр).

Порядок выполнения работы

1. Составить объектный модуль заданного варианта ОС (табл. 2.5).
2. Определить основные характеристики: а) SD – расстояние от предыдущей поверхности до АД; б) ND – число поверхностей до АД; в) поле зрения ОС (угловое или линейное); г) переднюю и заднюю апертуру ОС; д) спектральный диапазон работы ОС.
3. Рассчитать суммы Зейделя.
4. Рассчитать габариты пучков.
5. Распечатать исходные данные и результаты расчета в виде графиков и таблиц.

8.2. Расчет кардинальных элементов оптической системы по ходу нулевого луча

Краткие теоретические сведения

Кардинальные точки ОС лежат на оптической оси в пространствах предметов и изображений. Расположение их известно, что упрощает задачу построения сопряженных лучей. *Кардинальные элементы* – фокусы, фокальные плоскости, главные плоскости, главные точки и фокусные расстояния.

Расчет нулевого луча

Расчеты параксиальных лучей обычно заменяют расчетами нулевых лучей. Нулевой луч падает на произвольной высоте h_1 , составляя с оптической осью произвольный угол α_1 . Преломление нулевого луча происходит на касательных к вершинам поверхностей, являющихся *главными плоскостями*.

С помощью расчета нулевого луча, идущего от бесконечно удаленной осевой точки предмета (см. рис. 2.1), можно определить заднее фокусное расстояние f' и задний фокальный отрезок S'_F .

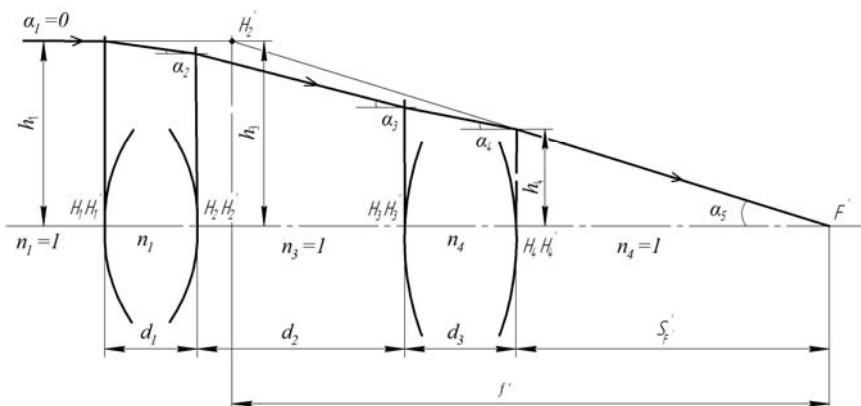


Рис. 2.1. Схема расчета фокусного расстояния

Для определения углов нулевого луча с оптической осью служит формула, полученная из инварианта Аббе:

$$\alpha_{k+1} = \frac{n_k}{n_{k+1}} \alpha_k + h_k \frac{n_{k+1} - n_k}{n_{k+1} r_k}, \quad (2.1)$$

где r_k – радиус k -й сферической поверхности;

n_k – показатели преломления соответствующих оптических сред;

h_k – высота нулевого луча на главной плоскости, определяемая по формуле:

$$h_{k+1} = h_k - \alpha_{k+1} d_k, \quad (2.2)$$

где d_k – расстояние между главными плоскостями.

Под величинами α_k подразумеваются тангенсы этих углов.

При составлении прикладных программ для выполнения компьютерных расчетов в формулы обычно вводятся изменения, уменьшающие число математических операций. Для расчета нулевого луча введем следующие вспомогательные величины:

$$\begin{aligned}
\gamma_s &= n_s \cdot \alpha_s; \\
\gamma_{s+1} &= n_{s+1} \cdot \alpha_{s+1}; \\
N_s &= h_s \cdot \frac{n_{s+1} - n_s}{r_s},
\end{aligned}
\tag{2.3}$$

тогда основные формулы примут вид:

$$\begin{aligned}
\gamma_{s+1} &= \gamma_s + N_s; \\
h_{s+1} &= h_s - N'_s,
\end{aligned}$$

где $N_s = \frac{\gamma_{s+1}}{n_{s+1}} \cdot d_s$.

Для расчета нулевого луча, идущего от бесконечно удаленного предмета ($\alpha_1 = \gamma_1 = 0$), задается только одна величина h_1 которая может иметь произвольное значение. Часто принимают $h_1 = |r_1|$, тогда $N_1 = n_2 - n_1$.

Расчет нулевого луча выполняется в порядке, в котором число строк соответствует числу поверхностей ОС, составляются специальные расчетные таблицы. Начало расчета $\alpha_1 = 0$, $\gamma_1 = 0$, $h_1 = |r_1|$.

Приведенная схема расчета нулевого луча дана для оптической системы с четырьмя поверхностями (табл. 2.5). Перед началом расчета записывают параметры оптической системы в следующем виде:

r_1	d_1	n_1
r_2	d_2	n_2
r_3	d_3	n_3
r_4		n_4
		n_5

В результате проведенного расчета определяются величины h_4 и γ_5 ; если $n_5 = 1$, то $\alpha_1 = \gamma_5$. Заднее фокусное расстояние определяется из формулы:

$$f' = \frac{h_1}{\alpha_5}, \quad S'_F = \frac{h_4}{\alpha_5}. \quad (2.4)$$

Положение заднего фокуса относительно последней поверхности определяется из треугольника, образованного выходящим из оптической системы лучом на высоте h_4 :

$$S'_F = \frac{h_4}{\alpha_5}. \quad (2.5)$$

Для определения переднего фокусного расстояния f и положения переднего фокуса оптическую систему следует перевернуть так, чтобы последний радиус занял место первого, при этом знаки радиусов меняются на обратные, поменяются местами толщины и показатели преломления. Полученные результаты берут с обратным знаком. Для расчета нулевого луча в обратном ходе задаются координаты $\bar{\alpha}_5 = 0$, \bar{h}_4 – произвольная величина (можно принять $\bar{h}_4 = |r_4|$).

Используют формулы (2.1) – (2.5) для расчета при *обратном ходе нулевого луча*. Тогда передний фокальный отрезок и переднее фокусное расстояние соответственно равны:

$$S_f = -\frac{\bar{h}_1}{\alpha_1}, \quad f = -\frac{\bar{h}_4}{\alpha_5}. \quad (2.6)$$

Необходимо учитывать, что в расчетах может быть случай, когда поверхность плоская, например, (ее радиус r_1 равен бесконечности), и луч проходит ее не меняя направления.

Начало расчета должно быть следующим:

$$\begin{aligned} \alpha_2 = 0, \quad \gamma_1 = \gamma_2 = 0, \quad h_1 = h_2 = |r_2|, \\ N_2 = n_3 - n_2, \quad \gamma_3 = N_2 = n_3 - n_2, \\ N'_2 = \frac{\gamma_s}{n_s} \cdot d_2, \quad h_3 = h_2 - N'_2. \end{aligned}$$

Графическое построение главных и фокальных плоскостей

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. 2.2).

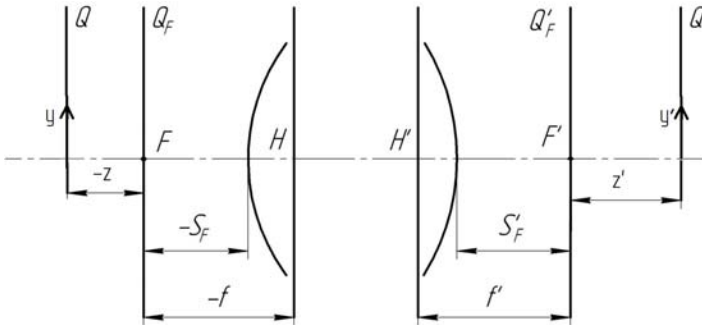


Рис. 2.2. Расположение предмета и изображения в ОС с кардинальными элементами

При расчете нулевого луча и построении главных плоскостей используется *основное свойство главных плоскостей*: точка пересечения луча, входящего в ОС, и луча, выходящего из системы, лежит на эквивалентной задней главной плоскости. Сопряженные лучи пересекают главные плоскости на одинаковых расстояниях от оптической оси: $h_1 = h'_3$. Для определения положения *задней главной плоскости* выполняют графическое построение нулевого луча, входящего в оптическую систему параллельно оптической оси, который в пространстве изображений пересекает оптическую ось в заднем фокусе системы F' . Графическое построение эквивалентной задней главной плоскости приведено на рис. 2.1.

Для определения положения передних фокальной и главной плоскостей относительно поверхностей оптической системы проводится графическое построение нулевого луча в обратном ходе (рис. 2.3). A – направление хода нулевого луча; Q_f – передняя фокальная плоскость, сопряженная с бесконечно удаленной плоскостью изображений; H_3 – передняя эквивалентная плоскость (всей системы).

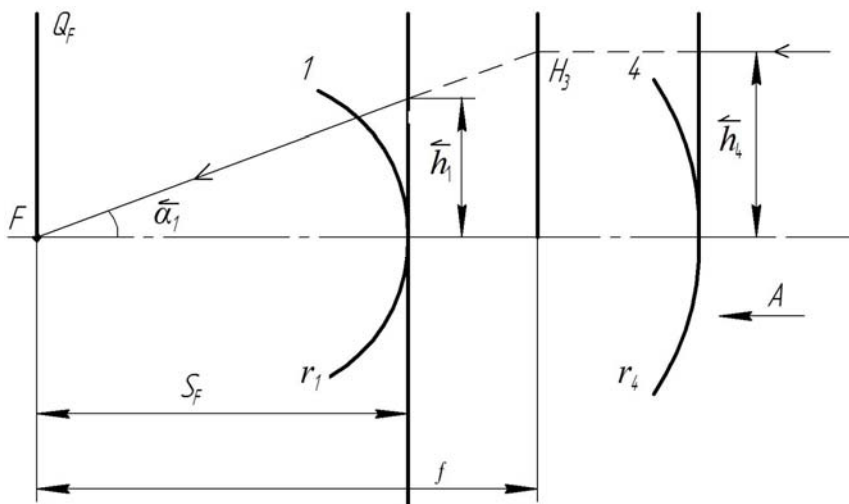


Рис. 2.3. Построение эквивалентной главной плоскости

Методика определения кардинальных элементов ОС:

1. Расчет нулевого луча, идущего от бесконечно удаленного предмета.

1.1. Выбор начальных данных и расчет параметров (высот h_s и углов α_s) на каждой оптической поверхности.

1.2. Определение (аналитически) заднего фокусного расстояния f' и заднего фокального отрезка S'_F .

1.3. Графическое построение хода нулевого луча и определение положения *задней* главной плоскости и *задней* фокальной плоскости.

2. Расчет нулевого луча, идущего от бесконечно удаленного изображения (в обратном ходе).

2.1. Выбор начальных данных и расчет параметров нулевого луча \bar{h}_s и $\bar{\alpha}_s$.

2.2. Аналитический расчет переднего фокусного расстояния f и переднего фокального отрезка S_F .

2.3. Графическое построение хода нулевого луча, входящего в систему параллельно оптической оси (в обратном ходе) и определение положения *передней* главной плоскости и *передней* фокальной плоскости.

Порядок выполнения работы

Расчетная часть:

а) рассчитать высоты нулевого луча на главных плоскостях поверхностей и углы нулевого луча с оптической осью;

б) с помощью расчета нулевого луча, идущего от бесконечно удаленного предмета в прямом и обратном направлениях рассчитать фокусные расстояния и фокальные отрезки, определив тем самым положение кардинальных плоскостей относительно первой и последней поверхностей заданного объектива.

Графическая часть:

а) определить графически положения главных и фокальных плоскостей двухлинзового объектива;

б) построить графически ход нулевых лучей в прямом и обратном направлениях;

в) выполнить оптическую схему двухлинзового объектива (рис. 2.4) по ГОСТ 2.412.81. Образец чертежа оптической схемы дан в приложении.

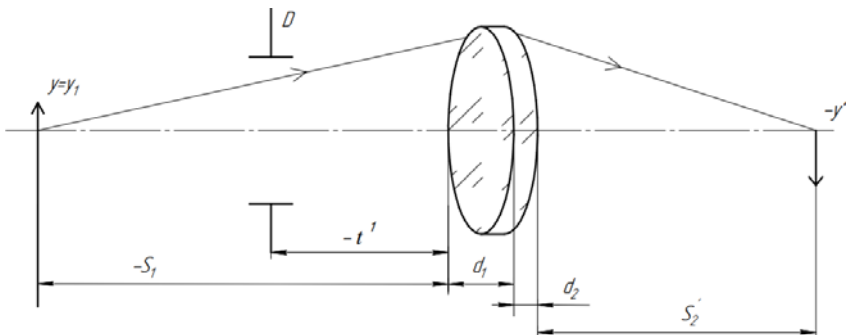


Рис. 2.4. Склеенный объектив

Дано: 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 описывают склеенные из двух линз объективы ($n_1 = n_4 = 1$), представленные на рис. 2.4. Остальные варианты описывают расклеенные объективы из двух линз ($n_1 = n_3 = n_5 = 1$).

Варианты заданий

Таблица 2.5

Конструктивные параметры двухлинзовых объективов

№	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 -15,92 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 -111,7 -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

Окончание табл. 2.5

№	S_1 , мм	y_1 , мм	t_1 , мм	D , мм	R	d	Марка стекла
1	2	3	4	5	6	7	8
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 -102,8 -744,7	4 2	К8 ТФ4
12	∞	5°	0	125	669,9 -642,7 -609,5 -2480	15 2 12	ТК17 ТФ4

Отчет выполняется по инструкции (приложение В).

В отчете привести описание и исходные данные заданной оптической системы, ее основных параметров. Кроме расчета требуемых характеристик привести необходимые компьютерные расчеты, а также дать распечатки (скриншоты) таблиц и графиков. Дать заключение о качестве изображения по суммам Зейделя

ПРИЛОЖЕНИЕ А

А.1. 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.

А.2. Техника безопасности при работе с ПЭВМ

Перед началом работы:

1. Проверить надежность соединения клем 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 питания.

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 ППП «Орал»

Б.1. Центрированные системы с плоскими, сферическими и асферическими поверхностями

ППП «Орал» предназначен для проектирования, исследования (анализ, синтез, оценка качества изображения) и оптимизации оптических систем различного типа, включая децентрированные ОС и системы с асферическими поверхностями. «Орал» – это аббревиатура выражения «Оптический Алгоритм».

В ППП «Орал» приняты следующие ограничения:

- количество поверхностей в ОС – не более 160,
- количество длин волн – не более 5,
- количество внеосевых пучков – не более 5.

При вычислении показателей преломления плавок оптических материалов ширина спектрального интервала может лежать в пределах от 0,365 мкм до 2,6 мкм.

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:

- предмет ближнего типа (на конечном расстоянии);
- предмет дальнего типа (на бесконечности).

Значение по умолчанию: дальнего типа (рис. Б.1).

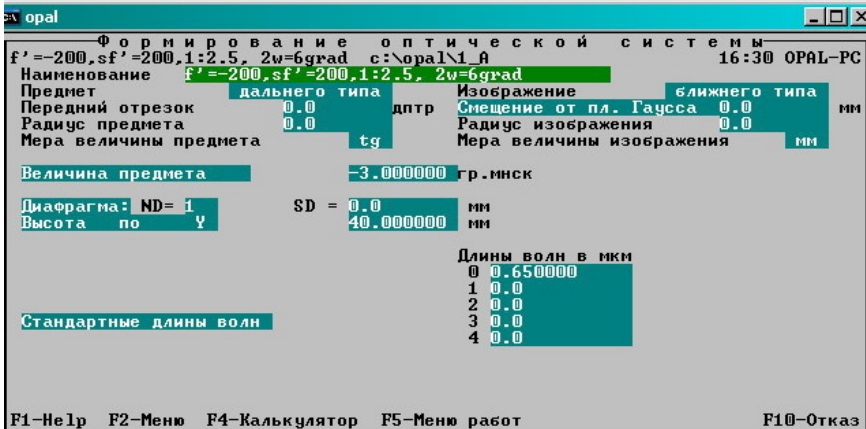


Рис. Б.1

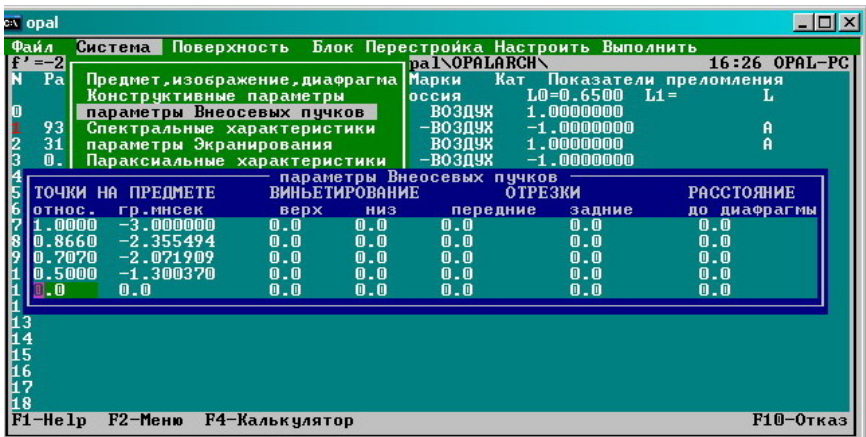


Рис. Б.2

Величина предмета.

Для ближнего 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. Б.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 1-й поверхности ОС до предмета в соответствии с правилом знаков. Значение «0» означает, что предмет совпадает с 1-й поверхностью. 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 отрезков для различных точек предмета (в меню «параметры внеосевых пучков»). По умолчанию значение равно 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 равно 0.

Параметры изображения

Значение по умолчанию: ближнего типа.

Признак типа изображения:

- изображение ближнего типа (изображение на конечном расстоянии);
- изображение дальнего типа (изображение удаленного типа на бесконечности).

Величина изображения.

Способ задания величины изображения не имеет особой специфики. При задании величины изображения в любом режиме автоматически определяется величина предмета.

Положение изображения.

Может быть задано двумя способами:

– Положение поверхности изображения либо в мм от последней поверхности ОС, 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 равно «0» указывает, что поверхность изображения есть плоскость. Значение радиуса поверхности 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. Б.3).

Радиусы поверхностей могут задаваться явно как элементы массивов R (радиусы) либо CR (кривизны) одним из следующих способов:

$$R = 104,2 - 600,3 - 88 - 104.2$$

$$CR = 0,00959 - 0,0016658 - 0,011363636 - 0,009596928$$

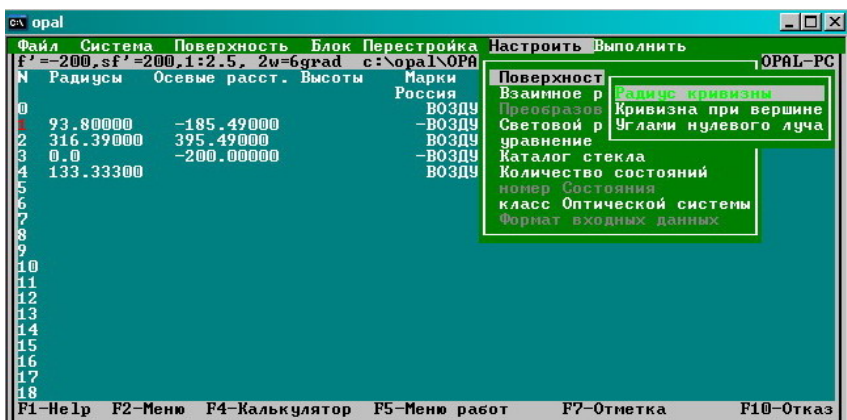


Рис. Б.3. Параметры поверхностей

Знак R зависит от ориентации поверхности: $R > 0$, если поверхность направлена выпуклостью влево, $R < 0$, если поверхность направлена выпуклостью вправо, для плоских поверхностей вместо $R =$ «бесконечность» условно принимается $R = 0$ ($CR = 0$). Предусмотрено неявное задание формы поверхностей с помощью углов нулевых лучей (задание по «альфам»). Пример: 1.14; 0.27; 0.14; 0.9 (высота 30).

Параметры взаимного расположения поверхностей

Взаимное расположение поверхностей в ОС 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 равно 0, то поверхность диафрагмы совпадает с соответствующей

поверхностью в системе (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 1-й поверхности до зрачка. Если предмет ближнего типа, SD задают в дптр от поверхности предмета до зрачка; для телецентрического хода лучей $SD = 0$ дптр.

Значение по умолчанию: $ND = 0$; $SD = 0$.

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
g	0.70645
A'	0.76649

Параметры оптических сред

Задаются несколькими способами:

- марка стекла;
- показатель преломления стекла;
- код стекла.

Знак, стоящий у марки, будет присвоен показателям преломления. Нумерация оптических сред начинается с нуля (0 – пространство предметов). Примеры: ВОЗДУХ–ВОЗДУХ; –K8; K8; ВОЗДУХ или 1; –1; –1.514092; 1; –1; –305.

Б.2. Печать в системе «Орал»

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 нажатием клавиши F7.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Содержание отчета

- Цель работы.
- Краткие теоретические сведения.
- Чертежи схем установок.
- Результаты измерений и обработка экспериментальных данных.
- Результаты расчётов, таблицы, графики.
- Заключение (выводы).
- Приложения (скриншот, чертежи, эскизы, графики и диаграммы).

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Контроль знаний Перечень контрольных вопросов к лабораторным работам

Лабораторная работа № 1

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 зрчках.
6. Ограничение апертурных и полевых лучей.
7. Разрешающая способность телескопической системы.
8. Методы измерения углового поля зрения и диаметра выходного зрчка.
9. Методика определения разрешающей способности.

Лабораторная работа № 2

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. Аберрационный расчет проекционных объективов.
6. Аберрационный расчет линзовых конденсоров.
7. Расчет эписистем и диасистем.
8. Ход лучей при эпипроекции (внеосевые и осевые пучки).
9. Ход лучей при диапроекции (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 № 3

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 дальнозоркого 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. Методика работы на офтальмоскопе, схемы.
12. Приборы для исследования глазного дна.

Лабораторная работа № 4

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 № 5

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 № 6

1. Дифракционная разрешающая способность оптических систем.
2. Критерий Релея.
3. Линейный и угловой пределы разрешения объектива.
4. Полезное увеличение оптических систем.
5. Штриховые миры.
6. Визуальная и фотографическая разрешающая способность фотообъектива.
7. Экспериментальная схема для исследования разрешающей способности.
8. Назначение коллиматора, микроскопа в лабораторной установке.
9. Положение апертурной диафрагмы и зрачков у фотообъектива.
10. Ограничение пучков в фотообъективе.
11. Классификация и основные оптические характеристики фотообъективов.
12. Частотно-контрастная характеристика.
13. Критерий добротности.

Лабораторная работа № 7

Линза

1. Кардинальные элементы для выпуклопослойной и плосковогнутой линзы: f' , S_F , S'_F , S_H , S'_H , $\Delta_{HH'}$.
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.

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, пирамиальность.
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. Правило знаков.
2. Конструктивные параметры оптической системы.
3. Параксиальные характеристики оптической системы.
4. Положительные и отрицательные системы.
5. Линейное, угловое и продольное увеличения. Связь между увеличениями.
6. Инварианты Аббе. Понятие оптического инварианта.
7. Параксиальные и нулевые лучи.
8. Понятие компонента. Формулы углов и высот нулевого луча в многокомпонентной системе.
9. Кардинальные элементы для линзы конечной толщины, расположенной в неоднородной среде (фокусные расстояния, главные плоскости, оптическая сила и т. д.).
10. Кардинальные элементы для линзы конечной толщины, расположенной в однородной среде (фокусные расстояния, главные плоскости, оптическая сила и т. д.).
11. Различные типы положительных и отрицательных линз.
12. Положения главных плоскостей в различных типах линзах.
12. Параксиальные характеристики ОС в системе «Орал».
13. Суммы Зейделя.
14. Определение габаритов пучков.
15. Просмотр габаритов пучков в табличной форме.
16. Передняя (задняя) апертура и положение входного (выходного) зрачка.
17. Характеристики главных лучей пучков в табличной форме.
18. Характеристики главных лучей пучков в графической форме.
19. Аберрации осевого пучка в табличной форме.
20. Аберрации лучей внеосевых пучков в табличной форме.
21. Координаты лучей. Особые ситуации, когда расчет невозможен.
22. Рисунок оптической системы в графическом режиме.
23. Выделение фрагмента рисунка; вывод параметров текущей поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Заказнов, Н. П. Теория оптических систем / Н. В. Заказнов, С. И. Кирюшин, В. И. Кузичев, – М. : Машиностроение, 1992. – 448 с.
2. Справочник конструктора оптико-механических приборов / В. А. Панов [и др.]; под общей ред. : В. А. Панова. – 3-е изд. – Л. : Машиностроение, 1980. – 742с. (коллективный автор).
3. Артюхина, Н. К. Теория и расчет оптических систем : учеб. пособие для вузов : в 2 частях. Ч. 1 / Н. К. Артюхина – Минск : Мин. Обр. РБ БНТУ, 2004. – 134с.
4. Вычислительная оптика. Справочник / М. М. Русинов [и др.]; под общей ред. : М. М. Русинова. – М. : Книжный дом «Либроком», 2009. – 742 с. (коллективный автор).
5. Артюхина, Н. К. Основы компьютерного моделирования оптических систем различных классов : учеб.-мет. пособие для вузов / Н. К. Артюхина – Минск : Мин. Обр. РБ БНТУ, 2016. – 182 с.
6. Правила выполнения чертежей и схем оптических изделий: ГОСТ 2.412-81.
7. Стекло оптическое бесцветное: ГОСТ 3514-94.
8. Соединение круглых оптических деталей с оправками: ОСТ 3-2124-74.
9. Классы чистоты поверхностей оптических деталей: ГОСТ 11141-84.
10. Линзы оптические: ОСТ 3-490-83.
11. Покрытия оптических деталей: ОСТ 3-1901-85.
12. Детали оптические. Фаски: ОСТ 3-1825-73.
13. Плотников, В. С. Расчет и конструирование оптико-механических приборов / В. С. Плотников [и др.]. – М. : Машиностроение, 1972.
14. Мальцев, М. Д. Расчет допусков на оптические детали / М. Д. Мальцев. – М. : Машиностроение. – 1974.
15. Нормальные линейные размеры: ГОСТ 6636-69.
16. Радиусы оптических поверхностей: ГОСТ 1807-75.
17. Погарев, Г. В. Юстировка оптических приборов / Г. В. Погарев. – Л. : Машиностроение, 1968.
18. Стекла пробные для проверки радиусов сферических поверхностей оптических деталей: ГОСТ 2786-82.
19. Клеи оптические: ГОСТ 14887-80.
20. Детали оптические склеенные: ОСТ 3-2989-85.
21. Детали оптические. Просветление травлением: ОСТ 3-2500-74.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ. ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ: ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЭЛЕМЕНТЫ	4
Лабораторная работа № 1	
Исследование телескопической системы.....	4
Лабораторная работа № 2	
Исследование эпископической и диаскопической проекционных систем	9
Лабораторная работа № 3	
Исследование оптики глаза. Измерение рефракции очковых стекол	18
3.1. <i>Исследование недостатков зрения</i>	20
3.2. <i>Исследование глазного дна</i>	23
Лабораторная работа № 4	
Исследование фотометрических характеристик нейтральных стекол. Измерение коэффициентов отражения оптических образцов	25
Лабораторная работа № 5	
Исследование аберраций оптической детали	31
Лабораторная работа № 6	
Исследование разрешающей способности фотообъектива	38
2. РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.	
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ЭЛЕМЕНТОВ	44
Лабораторная работа № 7	
Исследование призм и линз.....	44
Лабораторная работа № 8	
Компьютерное моделирование и расчет параксиальных характеристик и аберраций третьего порядка склеенного двухлинзового объектива.....	52
8.1. <i>Компьютерное моделирование</i>	53
8.2. <i>Расчет кардинальных элементов оптической системы по ходу нулевого луча</i>	55

ПРИЛОЖЕНИЕ А	64
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	65
ПРИЛОЖЕНИЕ В	72
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	73
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	75
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	80

Учебное издание

АРТЮХИНА Нина Константиновна

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебно-методическое пособие
по дисциплине «Теория и расчет оптических систем»
для студентов специальности 1-38 01 02
«Оптико-электронные и лазерные приборы и системы»

Редактор *А. С. Кириллова*

Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 23.12.2019. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 4,82. Уч.-изд. л. 3,77. Тираж 100. Заказ 809.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.