

Б. Н. БЕГУНОВ

# ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Издание второе, переработанное

*Допущено Министерством  
высшего и среднего специального  
образования РСФСР в качестве  
учебного пособия для студентов  
физических и оптико-механиче-  
ских специальностей вузов*

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
1966

Содержание курса предполагает усвоение студентами основных знаний по теоретическому обоснованию конструкции оптических систем

В книге последовательно излагаются основные представления и законы геометрической оптики, применительно к реальным и идеальным оптическим системам, а также основные теоретические положения устройства оптических систем телескопических, микроскопа, фотографического объектива, осветительных и проекционных систем Автор стремился кратко и последовательно изложить основные принципы устройства оптических систем с учетом их современного развития

В книге уделено много места применению основ геометрической оптики к вопросам расчета и конструирования оптических систем Схемы расчетов, числовые примеры и таблицы помогут читателям при решении конкретных практических задач

Книга будет полезна не только студентам, изучающим теоретические основы устройства оптических систем, но и широким кругам инженерно-технических работников.

Печатается по постановлению  
Редакционно-издательского совета  
Московского университета

---

## Глава I

### ВВЕДЕНИЕ

#### § 1. ЗНАЧЕНИЕ И РОЛЬ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Природа вооружила человека прекрасным оптическим инструментом — глазом. На внутренней поверхности глаза образуется оптическое изображение, воспринимаемое человеком как зрительный образ. Но возможности глаза ограничены. Глаз видит только те предметы, которые расположены непосредственно перед ним на сравнительно близком расстоянии, и не может различить отдельные детали далеко расположенных предметов. Глаз не видит в темноте.

Оптические приборы, созданные человеком, необычайно расширили возможности зрения. Приборы перископического типа позволяют наблюдать процессы, происходящие в помещениях, не доступных для человека. Окопные перископы, стереотрубы, танковые прицелы, перископы подводных лодок применяются для наблюдения из-за укрытий. Театральные и призмённые бинокли давно уже стали предметами нашего обихода. В мореплавании широко применяются различные подзорные трубы для рассмотрения далеких объектов.

Астрономические рефракторы и рефлекторы позволили проникнуть взором в глубины мирового пространства и открыть много новых звезд и звездных скоплений. С помощью этих приборов рассматривают ближайšie к Земле планеты и наблюдают процессы, происходящие на поверхности Солнца.

Приборы, позволяющие рассматривать далеко расположенные предметы и называемые телескопическими, весьма разнообразны. Среди них приборы для измерения координат движущихся целей, такие, как дальномеры и высотомеры, большая группа геодезических приборов: нивелиры, теодолиты и другие, позволяющие определять координаты точек на земной поверхности.

Невооруженный глаз различает предметы величиной около 0,1 мм. Применение луп повысило эту возможность до 0,01 мм, а с помощью микроскопа стало возможным различать малые объекты величиной до 0,15 мкм. Микроскоп применяется в различных отраслях науки и техники, в частности для контрольно-измерительных целей в виде компараторов, толщесмеров, отсчетных, координатных, инструментальных, универсальных и других микроскопов.

Успехи фотохимии вызвали значительное развитие фотографических приборов. Общеизвестны не только фотоаппараты различных типов и конструкций, но и различные фотографические устройства к микроскопам, телескопам, зрительным трубам, позволяющие фиксировать изображения в видимых и невидимых лучах спектра. Фотографические оптические системы применяются для фотографирования с экранов радиолокаторов, электронных осциллографов и телевизионных трубок, а также для фотографирования шкал счетно-решающих машин.

Оптические приборы позволяют проектировать ряд последовательных изображений на экран и получать впечатление движущихся объектов.

Сложные оптические системы в виде киносъёмочных камер, осветительных приборов, приборов для размножения фильмов, кинопроекторных аппаратов применяются в процессе создания кинофильма.

Киносъёмочные и проекционные устройства позволили осуществить стереоскопическое безочковое и поляроидное кино. Развитие оптических средств обусловило появление широкоэкранный, широкоформатный и панорамный кинематографов, а также круговой кинопанорамы.

Проекционные приборы в виде диапроекторов, эпипроекторов, эпидиаскопов, оптических и теневых проекторов нашли широкое применение как для исправления аэроснимков и карт, контроля изготовления деталей в металлопромышленности, так и для демонстрации различных рисунков и фотографий.

Неотъемлемой частью многих оптических приборов являются осветительные устройства, предназначенные для создания надлежащей освещенности рассматриваемых предметов. Такие устройства кроме источника света содержат и оптические детали— конденсоры и зеркала, позволяющие направить максимальный и возможно более равномерный световой поток на предмет.

Большое развитие за последнее время получили спектральные приборы: спектроскопы, спектрографы и спектрометры. Приборы спектрального анализа позволяют установить разницу в количественном содержании веществ, составляющих всего 0,0001 %.

Использование фотоэлектрического эффекта позволило создать большую группу фотоэлектрических приборов контроля автоматических процессов в различных отраслях народного хозяй-

ства. Широко применяются специальные оптические устройства фототелеграфных и фотогравировальных машин, светозаписи звуковых колебаний, фотореле и т. п. В телемеханических и электронных измерительных приборах (электрометры, зеркальные гальванометры, магнитоэлектрические осциллографы и др.) применяются специальные оптические устройства для записи и контроля показаний.

Для определения освещенностей, оптических плотностей и светопропускания служат фотометрические приборы. Люксметром измеряют освещенность, денситометром — оптическую плотность, универсальным фотометром — коэффициенты отражения непрозрачных тел и коэффициенты светопропускания прозрачных, микрофотометром — оптические плотности малых прозрачных участков. Спектродензограф позволяет определять оптические плотности непрозрачных тел в различных лучах спектра, а спектрофотометр — оптические плотности прозрачных тел, а также измерять распределение интенсивности излучения в спектре источника света.

В работах, связанных с изучением цвета, пользуются колориметрическими приборами. Эти приборы приобретают особое значение на транспорте, в полиграфии и в химии. Колориметр, например, позволяет определять цвет излучения или цвет окрашенной поверхности.

При помощи интерференционных приборов определяют качество изображения оптических систем, качество обработки различных поверхностей с точностью до долей микрона, измеряют очень малые расстояния.

Напряжения в материалах измеряются с помощью поляризационных приборов.

Можно выделить пять главных видов оптических приборов: 1) зрительные трубы (телескопические системы), 2) микроскопы, 3) фотографические объективы, 4) проекционные приборы, 5) осветительные приборы.

Иногда в одном приборе одновременно сочетаются признаки двух и более видов приборов. Например, металлографический микроскоп последовательно может служить и как обычный микроскоп и как фотографический прибор. В микрофотометре сочетаются осветительные устройства, оптическая система микроскопа, проекционные и фотографические устройства. Современные приборы сложны и основаны на взаимодействии многих механических, оптических и электрических устройств.

## **§ 2. КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК РАЗВИТИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ**

Основы современной оптики были заложены в далеком прошлом. Греческий философ Платон (427—347 гг. до н. э.) создал одну из первых теорий света, а Аристотель (384—322 гг. до н. э.)

объяснил сущность зрения. Хотя многие теоретические положения древних философов, а позднее и ученых средних веков, были недостаточны, порою просто ошибочны, тем не менее они способствовали развитию правильных взглядов на оптические явления и созданию различных оптических приборов.

Старейшие оптические приборы — лупа и очки

Изобретение зрительной трубы, а затем и микроскопа относится к началу XVII в. Предполагают, что зрительная труба была изобретена в Италии медиком Фракасторо (1483—1553), однако первая заявка на изобретение зрительной трубы была подана в Нидерландах Липперсгеем в 1608 г. В Италии в 1609 г. Галилеи изобрел свою знаменитую зрительную трубу с окуляром в виде отрицательной линзы. К этому же периоду относится и изобретение микроскопа, хотя дата и автор изобретения до сих пор неизвестны.

Оптика, как один из разделов физики, получила наиболее раннее развитие Энгельс, характеризуя развитие науки в средние века, писал, что физика, в собственном смысле слова, была еще в самой первоначальной стадии, за исключением оптики, успехи которой были вызваны практическими потребностями астрономии.

Значительное влияние на развитие оптики оказал Исаак Ньютон (1643—1727). В Кэмбридже в 1669, 1670 и 1671 гг. он читал «Лекции по оптике» (изданные в 1728 г), где излагал основы теории преломления света и происхождения цветов. В 1704 г. была издана работа Ньютона «Оптика или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света».

В России очки и зрительные трубы появились в начале XVII в., а в середине XVII в. они нашли широкое практическое применение, главным образом в военном деле.

Общий рост промышленности, торговли и военной техники при Петре I благотворно повлиял на дальнейшее развитие оптики в России.

Интересно отметить, что с момента учреждения в России Академии наук (1725 г.) там были организованы кафедра оптики и оптическая мастерская. Одним из руководителей кафедры оптики был академик Леонард Эйлер (1707—1783), написавший в 1771 г. книгу «Диоптрика», в которой изложил основы геометрической оптики. Оптическая мастерская при Петербургской академии наук существовала около ста лет и сыграла большую роль в развитии оптики в России.

Исключительное влияние на развитие оптики в России оказал Михаил Васильевич Ломоносов (1711—1765). В 1756 г. он написал трактат «О происхождении света», в котором излагается механика световых колебаний эфира на основе волновой теории. Кроме того, Ломоносов создал целый ряд оптических инструментов и приборов, разработал метод анализа прозрачных твердых тел и растворов по их показателю преломления, дал рецептуру и исследовал способы варки цветного стекла.

Развитие оптических приборов тормозилось из-за неумения бороться с хроматической аберрацией линз. Только в 1807 г. за рубежом появились первые ахроматические микроскопы.

В 1767 г. в Петербурге был открыт класс математических инструментов при Академии художеств, существовавший до 1795 г. и изготовлявший различные оптические приборы. В 1803 г. при Государственной адмиралтейской коллегии в Петербурге была организована оптическая мастерская, изготовлявшая главным образом оптические приборы для нужд российского флота.

Крупным событием в развитии оптического приборостроения был пуск в 1805 г. первого завода оптического стекла в Баварии.

Ко второй четверти XIX в. относятся замечательные работы в области оптических приборов минского чиновника О. Н. Малафеева, талантливого изобретателя-самоучки.

В середине XIX в. в работах по оптике принимают участие видные ученые Петербургского, Московского и других университетов. Профессор Казанского университета, известный математик П. И. Лобачевский (1793—1856) подает на конкурс в Петербургской академии наук работу «Об истинной теории света», в которой объясняет теорию света на основе волн-корпускул. Профессор физики Московского университета Н. А. Любимов (1830—1896) в 1872 г. публикует работу «Новая теория поля зрения и увеличения оптических снарядов», в которой он обосновал теорию поля зрения зрительных труб системы Галилея. Профессор физики Новороссийского университета Ф. Н. Шведов (1840—1905) разрабатывает систему оптического дальномера. Профессор физики Петербургского университета Ф. Ф. Петрушевский (1828—1904) разрабатывает в 1872—1873 гг. «лунный спектрофотометр», затем в 1884 г.— фотометр сравнения, ряд маячных осветительных устройств, а в конце 80-х годов вместе с братом, военным инженером,—дальномер.

Вторая половина XIX в. ознаменовывается изобретением новых источников света. В 1873 г. А. Н. Лодыгин демонстрирует первую лампу накаливания, а спустя три года, в 1876 г., П. Н. Яблочков берет патент на электрическую свечу. В. Н. Чиколев (1845—1898) разрабатывает кольцевой отражатель и создает новый метод испытания прожекторных отражателей (1892). Профессор физики Московского университета А. Г. Столетов (1839—1896) создает учебник «Введение в акустику и оптику» (1900), который на долгие годы становится настольной книгой всех занимающихся оптикой.

В начале XX в. учеными России были выполнены важные исследования по оптике. Профессор физики Московского университета П. Н. Лебедев (1866—1912) в 1899 г. впервые в мировой науке экспериментально показал существование давления света, а в 1909 г. продемонстрировал давление света на газы. Академик П. П. Лазарев (1878—1942) в 1907 г. и в более поздние годы в своих работах исследует химическое действие света. Его работы в области выцветания красок и пигментов имеют огромное при-

кладное значение. Академик Д. С. Рождественский (1876—1940) выполнил ряд работ в области аномальной дисперсии света в парах натрия и разработал интерференционный метод количественного изучения аномальной дисперсии в парах, так называемый «метод крюков» (1912).

В 1914 г. началась мировая война и был прекращен импорт в Россию оптических приборов и стекла. В связи с этим было организовано «Российское акционерное общество оптических и механических производств», а на Петербургском императорском фарфоровом заводе было начато производство оптического стекла. Уже в 1916 г. этот завод освоил варку нескольких сортов оптического стекла.

На этом заканчивается дореволюционный период развития оптики в России. Октябрьская революция открыла новую страницу в развитии русской науки. Наука приобрела значение важного государственного дела. На ее развитие государство стало отпускать значительные средства. Широкое распространение получила научно-исследовательская работа в учебных и во вновь созданных отраслевых институтах.

В декабре 1918 г. в Петрограде организуется Государственный оптический институт (ГОИ), специально предназначенный для решения различных научных и технических проблем в области оптического стекловарения и оптико-механического производства. В Ленинградском политехническом институте впервые в СССР в 1925 г. создается специализация по светотехнике под руководством академика М. А. Шателена (1865—1953). В Москве создается электротехнический институт (ВЭИ), вскоре ставший ведущим в области светотехники. Во многих научных институтах разрабатываются отдельные оптические вопросы прикладного характера. При Московском государственном университете в 1923 г. организуется институт физики, возглавляемый А. С. Предводителевым. В оптической лаборатории Института физики МГУ с 1930 г. развернулись крупные работы в области физической сущности света, спектрального анализа, флюоресценции и фосфоресценции.

Наряду с расширением сети научно-исследовательских институтов государство принимает ряд мер по расширению существующих и созданию новых оптико-механических заводов, которые занимаются выпуском оборудования для разнообразных нужд народного хозяйства страны (фотоаппаратов, микроскопов, измерительных приборов, киносъёмочной и проекционной аппаратуры и т. д.).

В связи с расширением оптического производства потребовались новые кадры, поэтому в ряде вузов были организованы специальные факультеты для подготовки специалистов в области оптики: оптико-механические факультеты ЛИТМО, МИИГАиК и МВТУ. Большой вклад в дело подготовки специалистов-оптиков внесли физические факультеты университетов, и в особенности Московского и Ленинградского.



В этот период объем выполненных работ в области оптики значительно увеличился.

Большую серию работ выполнил академик С. И. Вавилов (1890—1950) — основатель советской школы люминесценции и автор выдающихся работ по фотолюминесценции. С. И. Вавилов — автор большого количества книг и статей по различным разделам оптики.

Многие ученые нашей Родины за выдающиеся работы в области оптики награждены правительственными наградами. Среди них Г. С. Ландсберг — за разработку метода спектрального анализа для определения состава сплавов и спецсталей, Ф. А. Королев — за работы в области спектрального анализа, И. В. Обреимов — за труды о приложении дифракции для физических и технических измерений, С. И. Вавилов, В. П. Левшин, М. А. Константинова, В. А. Фабрикант, Ф. А. Бутаева и В. И. Долгополов — за разработку люминесцентных ламп, Н. Г. Басов и А. М. Прохоров — за создание молекулярного оптического генератора.

Государственный оптический институт (ГОИ) является ведущим учреждением в Советском Союзе в области оптики. Большую организационно-техническую работу по созданию института провел академик Д. С. Рождественский, бессменный руководитель института с 1918 по 1932 г. Его работы в области спектроскопии и микроскопии расширили возможности спектрального анализа и видения через микроскоп.

Первые работы ГОИ были направлены на развитие отечественного оптического стекловарения — базы оптико-механической промышленности. С первых дней создания института в нем работали талантливые ученые: академики И. В. Гребенщиков и А. А. Лебедев, члены-корреспонденты Академии наук Н. Н. Качалов и А. И. Тудоровский, работы которых в области производства оптического стекла позволили уже в 1927 г. прекратить его импорт. И сейчас, несмотря на значительный вклад ряда заводов оптического стекла в решение проблем стекловарения, ГОИ принадлежит ведущая роль на этом сложнейшем участке оптического производства.

Одновременно с решением проблем оптического стекловарения перед институтом были поставлены практические задачи по развитию оптотехнических методов испытания и контроля оптических систем, задачи по светотехнике, фотометрии и фотографии, задачи постановки вычислительного дела. Первоначально взятое направление работ соответствовало нуждам страны и в последующие годы все расширялось и углублялось, захватывая все новые и новые отрасли оптики.

Широкий круг вопросов вычисления оптических систем, анализа аберраций существующих оптических приборов был решен членом-корреспондентом АН СССР А. И. Тудоровским (1875—1963), руководителем вычислительного отдела ГОИ.

В оптотехническом отделе ГОИ под руководством академика

В. П. Линника производится разработка методов и приборов анализа оптических систем.

Вопросы светотехники разрабатываются во Всесоюзном научно-исследовательском светотехническом институте (ВНИСИ), выделенном из ВЭИ в 1951 г.

В годы Великой Отечественной войны 1941—1945 гг. оптическая промышленность была переселена в восточные районы страны и успешно разрешала вопросы производства в тяжелых условиях военного времени. «Советская оптика в лице своих ученых, инженеров и квалифицированных рабочих с честью выполнила свою задачу перед Родиной. Красная Армия во время войны никогда не жаловалась на оптику, она имела ее в хорошем виде и вдоволь»\*.

В послевоенные годы мирные устремления Советского Союза определили направление развития оптики в стране. Оптические заводы переключили свое производство на выпуск оптических приборов для удовлетворения нужд населения, научных исследований и промышленности.

В период 1949—1953 гг. оптико-механическая промышленность разработала и изготовила наиболее современные оптические приборы для лабораторий нового здания Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Среди них спектральные приборы, приборы большой дисперсии и разрешающей способности, интерференционные спектральные приборы, спектральные приборы для визуальных наблюдений, спектрофотометры, приборы для инфракрасной области спектра и др.

В 1951 г. В. А. Фабрикант, Ф. А. Бутаева и М. М. Вудынский открыли явление молекулярного усиления электромагнитных волн, послужившее началом развития новой отрасли оптического приборостроения — оптических квантовых генераторов, ныне получивших широкое применение в астрономии, технике связи и т. п.

В последнее десятилетие в связи с широким применением быстродействующих электронно-вычислительных машин стало возможно сократить сроки расчета сложнейших оптических систем.

Все больше применяются оптические системы с несферическими поверхностями, позволяющими достичь более высокого качества изображения, а также оптические системы двоякой симметрии, позволяющие получать различный масштаб изображения в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Советская оптико-механическая промышленность сейчас полностью удовлетворяет нужды промышленности и научных лабораторий отечественными приборами и оборудованием.

---

\* С. И. Вавилов Советская наука на службе Родины. М—Л, Изд-во АН СССР, 1946, стр. 127.

### § 3. ПРЕДМЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Оптика составляет часть физики. Необходимость применения разнообразнейших оптических приборов для научных, производственных и бытовых целей вызвала всестороннее развитие этого раздела физики.

Оптика разделяется на физическую и геометрическую. Изучение природы света и таких явлений, как интерференция, дифракция, поляризация и др., составляет предмет физической оптики.

Опытом были установлены четыре основных закона, имеющие для физической оптики приближенное значение: 1) закон прямолинейного распространения света, 2) закон независимого распространения лучей, 3) закон преломления и 4) закон отражения света.

На основе этих законов можно построить математическую теорию геометрических свойств распространения света. Эта теория, называемая геометрической оптикой, позволила объяснить образование изображения в оптических приборах и разработать конструкции этих приборов. Оптические приборы в наше время получили столь широкое распространение и развитие, что появилась необходимость выделять отдельные группы приборов, объединенные общими теоретическими свойствами и специализированные на решении однородных задач. Таким образом, были созданы оптика микроскопа, оптика телескопических систем, фотографическая оптика, проекционная оптика и др.

Теория аберраций и методика расчета оптических систем также являются частью геометрической оптики. Технологические основы сборки и юстировки оптических приборов в основном базируются на положениях геометрической оптики. Законы геометрической оптики используются при измерении постоянных оптических систем и деталей, при исследовании оптических свойств приборов и изучении их погрешностей. Таким образом, геометрическая оптика является теоретическим фундаментом оптических приборов.

Знание физической природы световых явлений позволяет установить границы применимости выводов геометрической оптики, так как полная теория физических приборов предполагает учет теоретических положений физической оптики.

---

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

## § 4. СВЕЯЩАЯСЯ ТОЧКА, СВЕТОВЫЕ ЛУЧИ И ПУЧКИ

В геометрической оптике под светящейся точкой понимают источник оптического излучения, не имеющий размеров. Это положение противоречит объяснению светящейся точки в физическом смысле, когда под светящейся точкой понимают тело, которое испускает оптическое излучение, но размерами которого можно пренебрегать по сравнению с расстоянием, на котором рассматривается это тело.

В геометрической оптике не делается различия между самосветящейся точкой, являющейся частицей светового тела источника света, и не самосветящейся, являющейся частицей какого-либо предмета, освещенного посторонним источником света.

В геометрической оптике под лучом света понимают ось световой трубки, в то время как в физической оптике луч света понимается как световая трубка, поперечные размеры которой весьма малы по сравнению с ее длиной. Световым лучам геометрической оптики соответствуют нормали к поверхности волны в физической оптике.

Таким образом, светящаяся точка и световой луч в геометрической оптике есть понятия математические.

Отверстия оптических приборов имеют всегда конечные размеры. Во входное отверстие прибора от одной светящейся точки попадает много лучей. Пучок лучей есть совокупность лучей. Если лучи выходят из одной точки или соединяются в одной точке, то пучок таких лучей называется *гомоцентрическим*. В оптический прибор поступают гомоцентрические пучки лучей. Эти пучки вследствие aberrаций оптической системы превращаются в негомцентрические, причем нарушение гомоцентричности наступает после преломления или отражения на первой же поверхности (кроме обычных случаев безабберационных поверхностей для дан-

ного пучка лучей). Пучки лучей бывают расходящиеся (рис. 1,а), сходящиеся (рис. 1,б) и параллельные (рис. 1,в).

Если из оптического прибора выходит гомоцентрический пучок, образующий одну точку изображения, то такое изображение называется *точечным*, или *стигматическим*. Изображение, образованное пересечением самих лучей, называется *действительным*, а изображение, образованное пересечением их геометрических продолжений, — *мнимым*.

На малую часть преломляющей поверхности  $ABB'A'$  падает гомоцентрический пучок лучей (рис. 2) Кривизны поверхности в направлениях  $DE$  и  $LK$  неодинаковы; в направлении  $DE$  кривизна больше. Вследствие этого лучи, падающие в точки  $D$  и  $E$ , после преломления пересекутся ближе к поверхности в точке  $F_1$ , а лучи, падающие в точки  $L$  и  $K$ , после преломления соберутся в точке  $F_2$ . В результате получим два изображения  $F_1'F_1''$  и  $F_2'F_2''$  в виде прямых отрезков, расположенных под углом друг к другу.

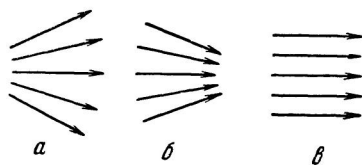


Рис 1 Пучки лучей

Пучок лучей, образующий такие изображения, перестает быть гомоцентрическим и называется *астигматическим*.

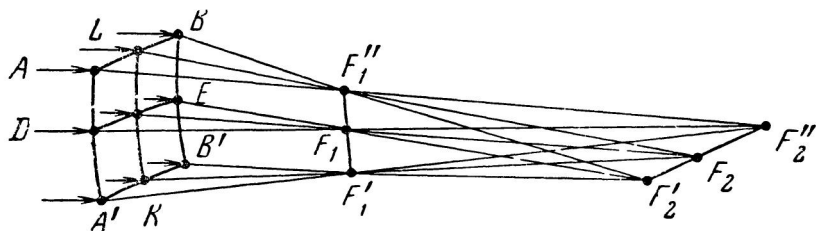


Рис. 2 Астигматический пучок лучей

*Астигматическим* называется такой пучок лучей, который образует изображение какой-либо точки предмета в виде двух отрезков, перпендикулярных друг другу.

Для астигматического пучка является характерным образование изображения в виде прямого отрезка. Это свойство используется в оптических приборах, например в светозаписывающих регистрационных приспособлениях (микрофотометры, осциллографы и т. д.). Частным случаем таких астигматических пучков является пучок, образованный положительной цилиндрической линзой (рис. 3), одно изображение которой находится на отрезке  $F_1F_2$ , а другое — в бесконечности.

Если гомоцентрический пучок падает на сферическую поверхность так, что ось этого пучка совпадает с перпендикуляром к

поверхности, то астигматический пучок не образуется, так как кривизны этой поверхности в двух взаимно перпендикулярных направлениях одинаковы.

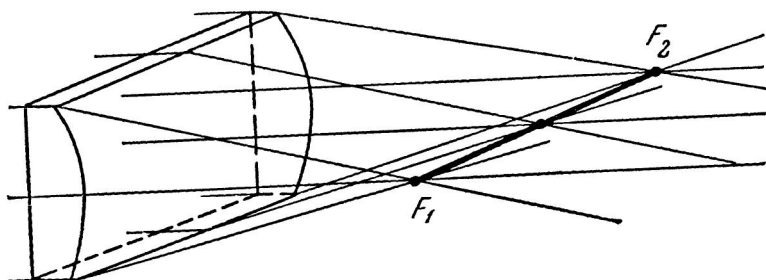


Рис. 3. Астигматический пучок, образованный цилиндрической линзой

## § 5. ЗАКОНЫ, ЛЕЖАЩИЕ В ОСНОВЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Наблюдение солнечных и лунных затмений, геодезические наблюдения, образование теней и полутеней показали прямолинейность распространения света. Закон прямолинейного распространения света является основным в геометрической оптике. Опыт показал, что закон прямолинейного распространения света несправедлив в случае прохождения лучей вблизи задерживающих экранов. Здесь мы встречаемся с явлением дифракции, получившим подробное рассмотрение в физической оптике. Геометрическая оптика не рассматривает явление дифракции. Но в теории оптических приборов всегда имеют в виду это явление, так как значительное диафрагмирование оптических систем может вызвать дифракцию, которая искажает изображение.

Геометрическая оптика исходит из закона независимости распространения лучей. Сущность его заключается в том, что отдельные лучи и пучки, встречаясь друг с другом, пересекаясь, не оказывают друг на друга влияния.

В действительности, при некоторых условиях имеет место явление интерференции, перераспределяющее освещенность в точках изображения. Интерференция является объектом изучения физической оптики. Однако в теории образования изображения интерференция имеет важное значение, так как объясняет распределение световой энергии в кружке рассеяния, которое в свою очередь позволяет судить о качестве изображения.

Следующими основными законами, на которых базируется геометрическая оптика, являются законы отражения и преломления света.

Если лучи, распространяясь в одной оптической среде, встречают другую среду, то на границе этих сред они полностью или

частично отражаются. При отражении лучи света подчиняются следующим законам:

1. Луч падающий и луч отраженный вместе с перпендикуляром, восстановленным к поверхности в точке падения, лежат в одной плоскости.

2. Угол отражения равен углу падения.

3. Луч падающий и луч отраженный обратимы.

Если лучи, встречая другую оптическую среду, преломляются, то они подчиняются следующим законам:

1. Луч падающий и луч преломленный вместе с перпендикуляром, восстановленным к поверхности в точке падения, лежат в одной плоскости.

2. Отношение синуса угла падения луча к синусу угла преломления для двух данных оптических сред есть величина постоянная. Это отношение называется *относительным показателем преломления двух сред*.

3. Луч падающий и луч преломленный обратимы.

Законы отражения и преломления имеют важное значение. Во-первых, они устанавливают, что лучи при прохождении через оптическую систему всегда лежат в плоскости, образованной падающим лучом и нормалью. Во-вторых, они устанавливают численные зависимости координат лучей при переходе от одной поверхности к другой, тем самым позволяют рассчитать ход луча через любую сложную оптическую систему. В-третьих, они указывают на возможность анализа оптических систем в обратном ходе лучей.

## § 6. ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Все оптические среды характеризуются абсолютным показателем преломления  $n$ , который называется *показателем преломления*. Абсолютным показателем преломления какой-либо оптической среды называется отношение синуса угла падения к синусу угла преломления при условии, что луч идет из вакуума в эту среду.

Показатель преломления вакуума, исходя из этого, равен единице. Обозначим угол падения луча через  $i$ , а угол преломления через  $i'$ . Показатель преломления первой среды  $n$ , а второй  $n'$ , тогда

$$n \sin i = n' \sin i'. \quad (6,1)$$

Произведение показателя преломления среды на синус угла между нормалью и лучом при каждом преломлении есть величина постоянная, называемая *оптическим инвариантом*.

В геометрической оптике принимают показатель преломления воздуха также равным единице, хотя его точное значение  $n=1,000274$  (при нормальном давлении 760 мм рт. ст. и температуре 20°C).

Зависимость показателя преломления воздуха от температуры

$t^{\circ}\text{C}$  и атмосферного давления  $P_{\delta}$  определяется формулой

$$n_{\text{в}} = 1 + 0,000294 \frac{P_{\delta}}{760} \cdot \frac{1}{1 + \frac{t}{273}}. \quad (6,2)$$

Так, например, по этой формуле при  $P_{\delta} = 760$  мм рт. ст. и  $t^{\circ}\text{C} = -50^{\circ}$   $n_{\text{в}} = 1,0003605$ . Часто для практических целей необходимо определять показатель преломления воздуха с точностью до  $10^{-6}$ .

Показатель преломления оптических сред зависит от длины волны проходящего света, и его принято нормировать для линии натрия  $D$ , т. е.  $n_D$ . Обычно индекс  $D$  опускается. В ряде случаев, особенно в зарубежной практике, показатель преломления указывается для линии гелия  $d$ , т. е.  $n_d$ .

Показатели преломления для различных цветов в видимой области спектра приводятся в каталогах или ГОСТах на оптическое стекло, а для невидимой области спектра вычисляются на основе знания каких-либо трех показателей преломления для трех длин волн. Для этой цели служат так называемые дисперсионные формулы. При вычислении показателя преломления оптического стекла в инфракрасной области спектра для диапазона длин волн от 800 нм до 2600 нм хорошие результаты дает формула Неймана—Кетслера

$$n_{\lambda} = a + b_{\lambda}^2 + \frac{c}{\lambda^2}, \quad (6,3)$$

где

$$c = \frac{\frac{n_1 - n_2}{1 - \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^2} - \frac{n_2 - n_3}{\left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2}\right)^2 - 1}}{\frac{1}{\lambda_1^2} - \frac{1}{\lambda_3^2}},$$

$$b = \frac{n_1 - n_2}{\lambda_1^2 - \lambda_2^2} + \frac{c}{\lambda_1^2 \lambda_2^2}$$

и

$$a = n_1 - b\lambda_1^2 - \frac{c}{\lambda_1^2}.$$

Так, например, вычисление показателя преломления стекла марки ОФЗ для  $\lambda = 1,5$  мкм при известных  $n = 1,59024$  ( $\lambda = 1,4$  мкм),  $n = 1,5850$  ( $\lambda = 1,7$  мкм) и  $n = 1,5792$  ( $\lambda = 2$  мкм) дает значения:  $c = 0,00454462$ ;  $b = -0,00483210$ ;  $a = 1,597392$  и  $n_{\lambda} = 1,58854$ .

**Пример 1.** Луч идет из воздуха в плоскопараллельную пластинку под углом  $30^{\circ}$ . Пластинка имеет показатель преломления  $1,5163$ . Определить угол преломления луча в пластинке.

**Решение.** Дано:  $i = 30^{\circ}$ ;  $n = 1$ ;  $n' = 1,5163$ .



Применим формулу (6,1)

$$\sin i' = \frac{\rho \sin i}{n'} = 0,32975,$$

или

$$i' = 19^\circ 15' 13''.$$

Этот пример показывает порядок величин, необходимый для вычислений. В практике встречаются случаи, когда необходимо вычислять угол преломления с точностью до сотых долей секунды.

## § 7. ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

Представим себе, что белый солнечный луч  $BP$  (рис. 4) падает под углом  $i$  на поверхность  $AA'$ , разделяющую две оптические среды с показателями преломления  $n$  и  $n'$ . При преломлении на границе этих двух сред происходит разложение белого света на составные части. Это явление называется дисперсией света. Это происходит потому, что белый луч составлен из ряда лучей с различной длиной волны, и эти лучи преломляются по-разному, образуя веер лучей в пределах угла  $di'$ .

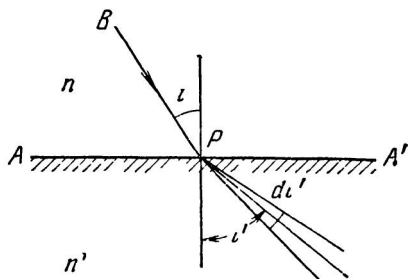


Рис 4 Дисперсия света

Для определения угловой величины дисперсии продифференцируем выражение (6,1) по переменным  $n'$  и  $i'$  при постоянных  $n$  и  $i$ :

$$dn' \sin i' + n' \cos i' di' = 0.$$

Отсюда

$$di' = - \frac{dn'}{n'} \operatorname{tg} i'. \quad (7,1)$$

Под  $dn'$  понимают разность показателей преломления для лучей, расположенных на краях изучаемого участка спектра, а под  $n'$  — показатель преломления для среднего (или наиболее эффективного) луча этого же диапазона спектра.

В частном случае, при исследовании видимого спектра, под  $n'$  понимают показатель преломления луча, соответствующего  $D$  — линии натрия. Угол  $i'$  вычисляют по формуле (6,1).

Способность стекла разлагать свет на составные части характеризуется коэффициентом дисперсии  $\nu$ :

$$\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}, \quad (7,2)$$

где индексы при показателях преломления соответствуют линиям

Фраунгофера. Этот коэффициент был введен в практику Аббе еще в прошлом столетии и иногда его называют числом Аббе.

Показатель преломления  $n$  и коэффициент дисперсии  $\nu$  являются главными оптическими постоянными оптических стекол. Значения этих постоянных для некоторых оптических стекол приведены в табл. I приложения.

Оптические стекла в среднем пропускают излучение в диапазоне длин волн 0,33—2,7 *мкм*.

**Пример 2.** Определить угловую дисперсию оптического стекла с  $n' = 1,6893$ , если в диапазоне длин волн от 365 *нм* до 950 *нм* разность показателей преломления составляет 0,08185. Угол падения луча на поверхность  $57^{\circ}38'04''$ .

**Решение.** Определим угол преломления по формуле (6,1)

$$\sin i' = \frac{\sin i}{n'} = 0,5; i' = 30^{\circ}; \operatorname{tg} i' = 0,57735.$$

Угловую дисперсию найдем по формуле (7,1):

$$di' = -0,027973,$$

или, в угловой мере:

$$di' = -1^{\circ}36'10''.$$

---

## ОБРАЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

## § 8. ПРЕЛОМЛЯЮЩИЕ И ОТРАЖАЮЩИЕ ПОВЕРХНОСТИ

В оптических деталях оптико-механических приборов встречаются различные поверхности.

Наиболее употребительной является *сферическая* поверхность. Она образовывается путем вращения дуги с радиусом кривизны  $r$  (рис. 5,а) относительно центра вращения  $C$  с радиусом вращения  $R$ . Для образования сферической поверхности необходимо выдержать условие:  $r=R$ . Если радиус кривизны дуги  $AB$  равен бесконечности, то при вращении такой дуги получается *цилиндрическая* поверхность (рис. 5,б).

Цилиндрическая поверхность есть соединение частных случаев сферической поверхности. В одном сечении действует сферическая поверхность с радиусом  $R$  конечного значения, а в другом — тоже сферическая поверхность, но с  $r=\infty$ .

Если  $r$  конечен и не равен  $R$ , можно рассмотреть два случая:  $R>r$  (рис. 5,в) и  $R<r$  (рис. 5,г).

В обоих случаях образуются *торические* поверхности.

В торических поверхностях имеем два взаимно перпендикулярных главных сечения, повернутых друг относительно друга на  $90^\circ$ , в которых действуют как бы сферические поверхности с радиусами кривизны  $r$  и  $R$ .

Кроме сферических применяются *несферические* поверхности тел вращения. Наиболее часто встречаются поверхности второго порядка: эллипсоид, гиперboloид и параболоид вращения.

Несферические поверхности позволяют получить хорошее исправление аберраций. Так, двухлинзовый конденсор с одной несферической поверхностью дает лучший в аберрационном отношении результат, чем шестилинзовый сферический.

Торические поверхности находят применение в очковой оптике, параболические — в отражателях, эллиптические — в конденсорах и отражателях.

Несферические поверхности, удовлетворяющие уравнениям высших порядков, применяются в осветительных системах и в объективах в тех случаях, когда необходимо достигнуть особо хорошее исправление аберраций или получить более простую конструкцию.

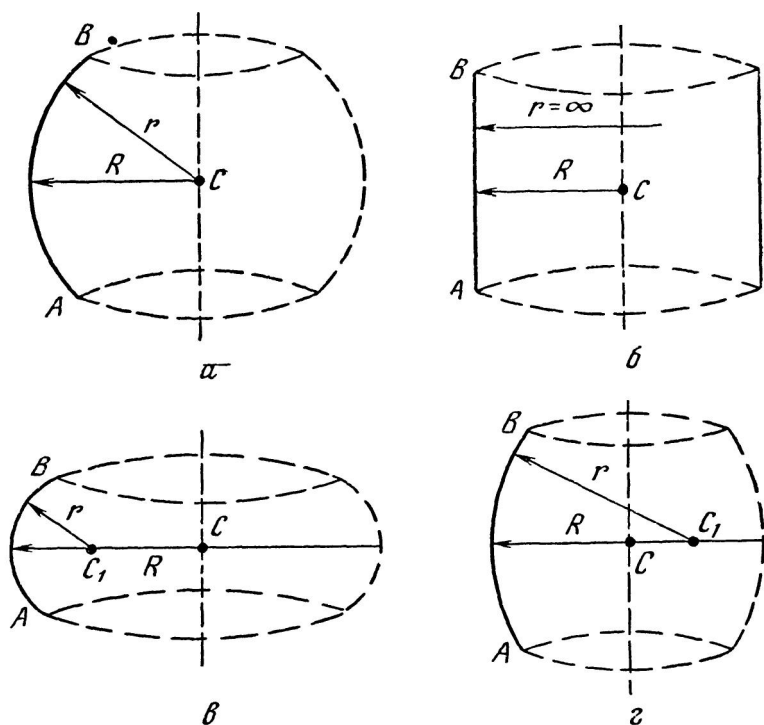


Рис 5 Виды поверхностей

### § 9. СИСТЕМА ПОВЕРХНОСТЕЙ И НУЛЕВЫЕ ЛУЧИ

Оптическая система любого прибора создается отражающими или преломляющими поверхностями, на которых происходит отражение или преломление лучей. Назначение этих поверхностей может быть различным. С их помощью получают оптическое изображение предметов, освещают те или иные объекты и т. д. По отношению друг к другу эти поверхности могут быть расположены различно.

Наличие двух и более поверхностей создает систему поверхностей. Одна из таких систем с радиусами кривизны  $r_1, r_2, r_3$  и  $r_4$  и центрами сферических поверхностей  $C_1, C_2, C_3$  и  $C_4$  показана на рис. 6. Если центры сферических поверхностей расположены на одной прямой, то такая система называется *центрированной*.

Прямая, соединяющая центры всех сферических поверхностей,

называется *оптической осью* системы. Очевидно, что луч, совпадающий с оптической осью, проходит все поверхности без преломления. Плоскость же, которая содержит оптическую ось, называется *меридиональной*. Ясно, что таких плоскостей имеется бесконечное количество. Если оптическая система в этих плоскостях обладает одинаковыми свойствами, то она называется оптической системой *круговой симметрии*. К таким системам относятся многие известные системы (фотообъективы, зрительные трубы, микроскопы), составленные из сферических поверхностей.

Центрированная система может быть образована с помощью торических или цилиндрических поверхностей, но эти системы обладают различными свойствами в двух взаимно перпендикулярных направлениях и называются оптическими системами *двоякой симметрии*.

Оптическая же система, составленная из поверхностей, центры кривизны которых не лежат на одной оптической оси, называется *кособокой*.

Преобладающая часть оптических приборов имеет центрированные оптические системы, которые и рассматриваются в дальнейшем.

Для удобства вывода различных уравнений введем понятие нулевых лучей. *Нулевыми*, или *параксиальными*, лучами называются лучи, идущие бесконечно близко к оптической оси, или под весьма малыми углами к ней. В этом случае синусы и тангенсы углов, образуемых лучами с осью, могут заменять друг друга и, кроме того, могут быть заменены значениями углов в радианах. Область, в пределах которой можно производить такие замены, называется нулевой, или параксиальной.

Формулы, выведенные для этой области на основе нулевых лучей, имеют простую математическую форму. Они также являются справедливыми и для оптической системы, в которую поступают широкие пучки лучей под большими углами к оптической оси, так как местоположение теоретического изображения одно и то же как для лучей нулевой области, так и для пучков лучей с конечными углами.

## § 10. ПРАВИЛО ЗНАКОВ

В оптике для отсчета различных отрезков и углов приняты определенные правила знаков. Они исходят из принятого за положительное направление распространения света слева направо.

Поэтому оптические системы принято изображать так, чтобы первая входная поверхность их была на рисунке слева.

1. Линейные отрезки по оси считаются положительными, если

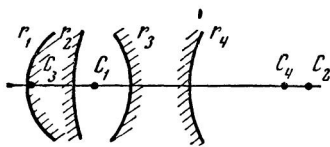


Рис. 6. Центрированная оптическая система

направление их отсчета от оптической системы совпадает с направлением света, и отрицательными, если они направлены в противоположную сторону (рис. 7,а).

2. Радиус кривизны поверхности считается положительным, если центр кривизны находится справа от поверхности, и отрицательным, если центр кривизны находится слева от поверхности (рис. 7,б).

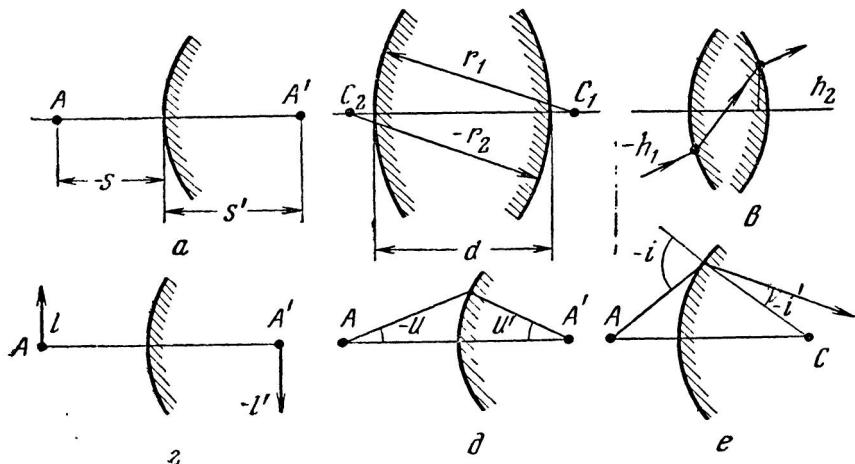


Рис. 7. Знаки отрезков и углов

3. Величины толщин линз и других оптических деталей, а также воздушных промежутков между преломляющими поверхностями  $d$  всегда считаются положительными (рис. 7,б).

4. Высоты пересечения лучей на поверхностях  $h$  и величины предметов и изображений  $l$  и  $l'$  считаются положительными вверх от оптической оси и отрицательными вниз от нее (рис. 7,в,г).

5. Угол луча с оптической осью считается положительным, если для совмещения оси с лучом ось нужно вращать по часовой стрелке, и отрицательным, если ось нужно вращать против часовой стрелки (рис. 7,д).

6. Углы между лучами и нормалью к поверхности в точке падения луча  $i$  и  $i'$  (углы падения и преломления) считаются положительными, если для совмещения нормали с лучом ее надо вращать по часовой стрелке, и отрицательными, если нормаль нужно вращать против часовой стрелки (рис. 7,е).

Знак плюс при обозначениях опускается.

7. При отражении от поверхности изменяется знак у показателя преломления  $n'$  и величины расстояния  $d$  между отражающей поверхностью и следующей за ней.

## § 11. ЛИНЕЙНОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ

*Линейным* увеличением называется отношение величины изображения к величине предмета:

$$\beta = \frac{l'}{l}. \quad (11,1)$$

В сложной оптической системе линейным увеличением называется отношение величины изображения после последней преломляющей (или отражающей) поверхности к самому предмету, т. е.

$$\beta = \frac{l'_k}{l_1}. \quad (11,2)$$

Линейное увеличение иногда называют *поперечным* увеличением.

Линейное увеличение определяет масштаб изображения. Оптические системы круговой симметрии имеют одинаковое значение линейного увеличения во всех точках изображения, а оптические системы двоякой симметрии имеют различное значение линейного увеличения в двух взаимно перпендикулярных направлениях плоскости изображения.

## § 12. ГЛАВНЫЕ ТОЧКИ И ФОКУСНЫЕ РАССТОЯНИЯ

Представим себе оптическую систему, состоящую из ряда сферических поверхностей, в которой поверхности  $O$  и  $O'$  (рис. 8) являются первой и последней поверхностями,  $FOO'F'$  — оптическая ось этой системы.

Любую оптическую систему можно характеризовать способностью собирать лучи в одну точку при условии, что эти лучи идут из бесконечности параллельным пучком параллельно оптической оси. Если лучи направляются в оптическую систему из пространства предметов (пространство, в котором расположены предметы), то они собираются в точке, которую называют *задним (вторым) фокусом*. Если же лучи идут из пространства изображений, то в пространстве предметов так же, как и ранее, они образуют одну точку схода, которую условились называть точкой *переднего (первого) фокуса*.

Действие всех преломляющих поверхностей для луча или лучей, идущих из бесконечности, можно свести к действию условной плоскости, перпендикулярной оптической оси, содержащей в себе точку пересечения лучей, как бы входящих в систему и выходящих из нее. На рис. 8 такой точкой является точка  $H_2$  для лучей, идущих слева направо, а если рассматривать ход лучей справа налево, — точка  $H_1$ . Для нахождения этих точек в оптическую систему направляют два луча, один из точки  $F$ , а второй параллельно оптической оси по направлению из  $M$  в  $M'$ . В пространстве изображений эти лучи пойдут: первый параллельно оптической

оси в  $M'$ , а второй в точку  $F'$ . Продолжение входящего и выходящего лучей дает точку пересечения их  $H_2$ .

Затем направим в оптическую систему лучи из пространства изображений. Один — из точки  $F'$ , а второй параллельно оптической оси из  $M'$  в  $M$ . После преломления эти лучи пойдут: первый

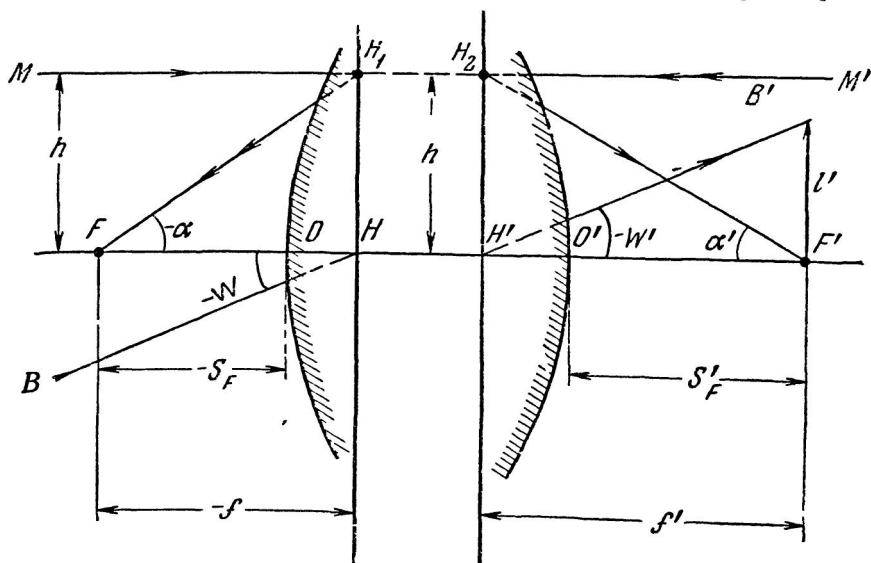


Рис 8. Главные точки и фокусные расстояния

параллельно оптической оси в  $M$ , а второй в точку  $F$ . Аналогично предыдущему, пересечение входящего и выходящего лучей дает точку пересечения их в  $H_1$ .

Если из этих точек опустить перпендикуляры на оптическую ось, то они пересекут ее в точках  $H$  и  $H'$ . Плоскости, содержащие точки  $H, H_1$  и  $H', H_2$  и перпендикулярные оптической оси, называются главными плоскостями. Точки  $H$  и  $H'$ , представляющие *передней (первой) и задней (второй) главными точками системы*. Точки  $H_1$  и  $H_2$  являются точками сопряженными, так как выше было показано, что в каждой из них пересекаются попарно сопряженные лучи  $MH_1-H_2F'$  и  $FH_1-H_2M'$ . Отсюда следует, что точка  $H_2$  является изображением точки  $H_1$ , но расстояния этих точек от оси одинаковы. Следовательно, и величины изображения в главных плоскостях одинаковы. Отсюда вытекает важное свойство главных плоскостей, определяющее их название: главными плоскостями называются плоскости, линейное увеличение в которых равно плюс единице.

Плоскость  $H_2H'$  называется *задней (второй) главной плоскостью*, а плоскость  $H_1H$  — *передней (первой) главной плоскостью*.



Расстояние от задней главной точки до заднего главного фокуса называется *задним (вторым) фокусным расстоянием*. Расстояние от передней главной точки до переднего главного фокуса называется *передним (первым) фокусным расстоянием*.

В плоскостях, перпендикулярных оптической оси, проходящих через точки фокусов  $F$  и  $F'$ , находятся изображения бесконечно удаленных предметов. Плоскость, проходящая через точку заднего фокуса, называется *задней фокальной плоскостью*, а плоскость, проходящая через точку переднего фокуса, называется *передней фокальной плоскостью*. Расстояние от вершины последней поверхности оптической системы до точки заднего фокуса называется *задним вершинным фокусным расстоянием*. Расстояние от вершины первой поверхности оптической системы до точки переднего фокуса называется *передним вершинным фокусным расстоянием*.

Знаки главных фокусных расстояний  $f$  и  $f'$  и вершинных фокусных расстояний  $s_F$  и  $s'_F$  всегда соответствуют правилу знаков. Фокусные расстояния (переднее и заднее) отсчитываются от главных плоскостей, а вершинные — от вершин сферических поверхностей.

Оптическая система характеризуется знаком заднего фокусного расстояния. Если заднее фокусное расстояние имеет знак плюс, то такая система называется *положительной*, или *собирающей*, если — минус, то *отрицательной*, или *рассеивающей*.

Из рис. 8 следует:

$$f' = \frac{h}{\operatorname{tg} \alpha'}, \quad (12,1)$$

$$f = \frac{h}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (12,2)$$

Фокусное расстояние может быть выражено и через величину изображения  $l'$ . Луч  $VH$  из пространства предметов направляется в переднюю главную точку  $H$  под углом  $\omega$ . Так как линейное увеличение в главных точках равно  $+1$ , то луч выйдет из задней главной точки  $H'$  под углом  $\omega'$ , равным  $\omega$ . Здесь предполагаем, что оптическая система расположена в однородной среде, например в воздухе, т. е.  $n=n'=1$ .

Луч  $H'B'$  образует в задней фокальной плоскости изображение величиной  $l'$ .

Из рис. 8 легко получаем

$$f' = -\frac{l'}{\operatorname{tg} \omega'}, \quad (12,3)$$

а так как  $-f = f'$ , то и

$$f = \frac{l'}{\operatorname{tg} \omega'}, \quad (12,4)$$

или, так как  $\omega = \omega'$ , то

$$f' = -\frac{l'}{\operatorname{tg} \omega}. \quad (12,5)$$

Величина заднего фокусного расстояния является основным параметром, которым принято характеризовать любую оптическую систему.

Оптическая система, для которой толщины линз и воздушных промежутков приняты равными нулю, называется *тонкой*. Для тонкой системы показывают не две главные плоскости, а одну, в которой как бы сливаются вместе передняя и задняя.

### § 13. ПРЕЛОМЛЕНИЕ ЛУЧЕЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Сферическая поверхность  $O$  с радиусом кривизны  $r$  (рис. 9) разделяет две оптические среды с показателями преломления  $n$  и  $n'$ . Предмет расположен в точке  $A$  на расстоянии  $s$  от поверх-

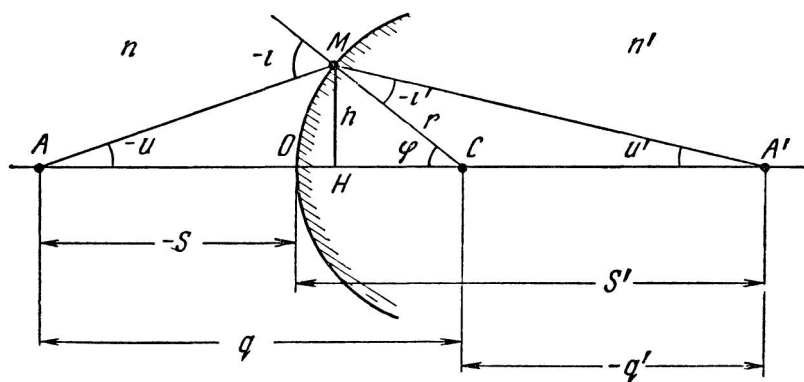


Рис 9 Сферическая преломляющая поверхность

ности, а его изображение — в точке  $A'$  на расстоянии  $s'$  от той же поверхности. Луч света из точки  $A$  направляется на сферическую поверхность в точку  $M$  под конечным углом  $u$ . Луч падающий и луч преломленный с перпендикуляром  $MC$  образуют углы  $i$  и  $i'$ . Высота падения луча на поверхность  $h$ . Преломленный луч направляется в точку  $A'$  под углом  $u'$ .

Обозначим расстояние от точек предмета  $A$  и изображения  $A'$  до центра кривизны  $C$  через  $q$  и  $q'$ .

Знаки величин указаны в соответствии с правилом знаков. Сферическая поверхность  $O$  разделяет два пространства — пространство предметов и пространство изображений.

Начальными данными для вычисления преломления луча на поверхности являются расстояние предмета от поверхности  $s$  и угол  $u$ , под которым луч направляется на поверхность.

Для вычисления преломления луча необходимо знать значение кривизны поверхности и значения показателей преломления оптических сред, разделенных этой поверхностью

Искомыми данными являются положение изображения за поверхностью  $s'$  и угол  $u'$ , под которым луч выходит из поверхности.

Рассмотрим преломление действительного луча на одной сферической поверхности. Из рис. 9 следует

$$q = r - s. \quad (13,1)$$

Из тр-ка  $AMC$  по формуле синусов имеем

$$-\frac{r}{\sin u} = \frac{q}{\sin(180^\circ + i)},$$

или

$$\sin i = \frac{q \sin u}{r}. \quad (13,2)$$

Угол преломления  $i'$  найдем из закона преломления (6,1)

$$\sin i' = \frac{n \sin i}{n'}. \quad (13,3)$$

Из тр-ка  $AMC$  имеем:

$$-i = \varphi - u,$$

а из тр-ка  $CMA'$ :

$$\varphi = u' - i'.$$

Отсюда

$$u' = u + i' - i. \quad (13,4)$$

По формуле синусов, из тр-ка  $CMA'$  имеем:

$$q' = \frac{r \sin i'}{\sin u'}. \quad (13,5)$$

и, наконец, как видно из рисунка,

$$s' = r - q'. \quad (13,6)$$

Формулы (13,1)—(13,6) являются основными для вычисления преломления луча на одной поверхности

Если оптическая система состоит из нескольких поверхностей, то необходимо последовательно выполнить аналогичные вычисления через все поверхности. При этом  $u_1' = u_2$ ;  $u_2' = u_3$  и т. д. Точка изображения после

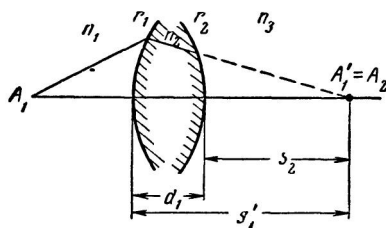


Рис 10 К определению положения предмета для второй поверхности

первой поверхности будет являться точкой предмета для второй поверхности и т. д. Рис. 10 поясняет переход с первой поверхности на вторую (здесь и в дальнейшем преломляющая поверхность обозначается индексом, характеризующим радиус кривизны этой поверхности). Легко видеть, что

$$s_2 = s'_1 - d_1. \quad (13,7)$$

Для удобства прохождения луча через систему поверхностей вышеуказанные формулы изображают в виде схем (см. схему 4, § 41).

Высоту луча на поверхности можем найти из тр-ка  $MHC$  (рис. 9):

$$h = r \sin(u' - i'). \quad (13,8)$$

Предположим, что луч  $AM$  является нулевым.

Из уравнений (13,2) и (13,5) следует:

$$\frac{q \sin u}{\sin i} = \frac{q' \sin u'}{\sin i'}.$$

Подставив сюда уравнения (13,1), (13,3) и (13,6) и заменив  $\sin u$  и  $\sin u'$  на  $u$  и  $u'$  соответственно, причем  $u = \frac{h}{s}$ , а  $u' = \frac{h}{s'}$ , получим

$$\frac{u(r-s)}{s} = \frac{u'(r-s')}{s'}.$$

Разделив обе части равенства на  $r$ , получим

$$n \left( \frac{1}{s} - \frac{1}{r} \right) = n' \left( \frac{1}{s'} - \frac{1}{r} \right). \quad (13,9)$$

Это выражение носит название «нулевого» инварианта Аббе. Открыв скобки, получим последнее выражение в иной форме:

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r}. \quad (13,10)$$

В таком виде это уравнение называется *уравнением нулевого луча*.

Из уравнения (13,9) можем найти фокусные расстояния одной поверхности. Предположим, что луч идет на поверхность из бесконечности, тогда  $s = -\infty$ , а  $s' = f'$ . Подставляя эти равенства в формулу (13,9), получим

$$-\frac{n}{r} = n' \left( \frac{1}{f'} - \frac{1}{r} \right),$$

или заднее фокусное расстояние

$$f' = \frac{n'r}{n' - n}. \quad (13,11)$$

Если же  $s' = \infty$ , то  $s = f$  и из уравнения (13,9) переднее фокусное расстояние

$$f = -\frac{nr}{n' - n}. \quad (13,12)$$

Разделив выражение (13,11) на (13,12), получим зависимость между фокусными расстояниями и показателями преломления

$$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n}. \quad (13,13)$$

Эту зависимость, найденную для одной поверхности, можно распространить и на систему, состоящую из ряда поверхностей.

В однородной среде фокусные расстояния оптической системы, переднее и заднее, равны по абсолютной величине и противоположны по знаку.

Если же первая и последняя оптические среды не одинаковы, что имеет место, например, если линза или объектив опущены в воду, то абсолютное значение фокусного расстояния зависит от величины радиуса кривизны первой поверхности. Отношение же переднего и заднего фокусных расстояний определяется уравнением (13,13).

Например в случае, когда линза с радиусами кривизны  $r_1 = 17,58$  и  $r_2 = -21,03$ ;  $d = 5$  и  $n = 1,5467$ , имеющая фокусное расстояние  $f' = 18,35$  мм, опущена в воду так, что с водой ( $n = 1,33$ ) соприкасается поверхность с радиусом  $r_1$ , тогда  $f = -35,67$  и  $f' = 26,82$  мм. Если же с водой соприкасается поверхность с радиусом  $r_2$ , то  $f = -32,95$  и  $f' = 24,77$  мм. Также изменяется и местоположение изображения. В этих случаях отношение  $f'/f$  равно  $-1,33$ .

Вернемся к рис. 9 и установим зависимость между углами  $i$  и  $i'$  для нулевого луча. Эти углы в параксиальной области обозначим через  $\alpha$ .

Закон преломления напишем в виде

$$ni = n'i'.$$

Так как  $i = \alpha - \varphi$ , а  $i' = \alpha' - \varphi$ , можем записать

$$n(\alpha - \varphi) = n'(\alpha' - \varphi).$$

Подставим сюда выражение  $\varphi = \frac{h}{r}$  и откроем скобки

$$n\alpha - \frac{nh}{r} = n'\alpha' - \frac{n'h}{r}$$

и после преобразования окончательно получим

$$\alpha' = \frac{n}{n'}\alpha + \frac{h(n' - n)}{rn'}. \quad (13,14)$$

Таким образом, мы получили уравнение углов нулевого луча.

Переходя к индексам поверхностей, уравнение (13,14) перепишем в виде

$$\alpha_{k+1} = \frac{n_k}{n_{k+1}} \alpha_k + \frac{h_k(n_{k+1} - n_k)}{r_k n_{k+1}}. \quad (13,15)$$

Отсюда получим формулу радиуса

$$r_k = \frac{h_k(n_{k+1} - n_k)}{\alpha_{k+1} n_{k+1} - \alpha_k n_k}. \quad (13,16)$$

Схема вычисления радиусов кривизны приведена в § 41 (схема 2).

Если в уравнении (13,16) положить

$$\alpha_k n_k = \gamma_k, \quad (13,17)$$

то оно примет вид

$$\gamma_{k+1} = \gamma_k + h_k \frac{n_{k+1} - n_k}{r_k}. \quad (13,18)$$

В таком виде эта формула, развернутая в схему, дает возможность наиболее просто производить вычисление прохождения нулевого луча через сложную оптическую систему.

Для вычисления хода луча, кроме того, необходимо знать формулу определения высоты  $h$ .

Луч (рис. 11) падает на поверхность с радиусом кривизны  $r_k$  на высоте  $h_k$ , после преломления встречает поверхность с радиусом кривизны  $r_{k+1}$  на высоте  $h_{k+1}$ . Расстояние между поверхностями  $d_k$ .

Так как луч нулевой, то практически расстояние между вершиной поверхности и следом перпендикуляра (высоты) на оптической оси для каждой поверхности равно нулю.

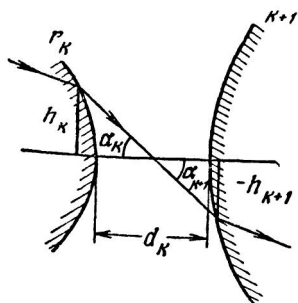


Рис 11. К выводу формулы высот

Итак,

$$\frac{h_k - h_{k+1}}{d_k} = \alpha_{k+1}.$$

Преобразуя, получим

$$h_{k+1} = h_k - \alpha_{k+1} d_k. \quad (13,19)$$

Схема вычисления нулевого луча приведена в § 41 (схема 3).

**Пример 3.** Определить местоположение щели спектрального прибора, освещаемого источником света с помощью конденсорной линзы, если расстояние от источника света до линзы равно 80 мм, а линза имеет конструктивные элементы  $r_1 = 40$  мм,  $r_2 = -40$  мм,  $d = 5$  мм и  $n = 1,5163$ .

**Решение.** Из формулы (13,10) следует

$$s' = \frac{n'rs}{s(n' - n) + rn},$$

тогда, подставив формулу (13,7), получим

$$s'_1 = \frac{n_2 r_1 s_1}{s_1(n_2 - n_1) + r_1 n_1}.$$

Для 1-й поверхности имеем:  $r_1 = 40$ ;  $n_1 = 1$ ;  $n_2 = 1,5163$ ;  $s_1 = -80$ ; после подстановки получим

$$s'_1 = 3720,98.$$

Для 2-й поверхности предметом является изображение, полученное после 1-й поверхности:

$$s_2 = s'_1 - d = 3715,98,$$

и аналогично при  $r_2 = -40$ ;  $n_2 = 1,5163$ ;  $n_3 = 1$

$$s'_2 = \frac{n_3 r_2 s_2}{s_2(n_3 - n_2) + r_2 n_2} = 75,1 \text{ мм.}$$

**Пример 4.** Вычислить углы нулевого луча с оптической осью для случая, приведенного в примере 3.

**Решение.** Дано:

$$\begin{array}{llll} r_1 = 40 \text{ мм} & & n_1 = 1 & \\ & d_1 = 5 \text{ мм} & n_2 = 1,5163 & s_1 = -80 \\ r_2 = -40 \text{ мм} & & n_3 = 1 & \end{array}$$

Применим формулы (13,18), (13,19) и (13,17):

$$\gamma_1 = \alpha_1 n_1, \quad \text{где} \quad \alpha_1 = \frac{\hat{h}_1}{s_1}.$$

Положим для удобства вычислений  $h_1 = r_1$ .

$$\gamma_1 = \frac{n_1 h_1}{s_1} = -0,5, \quad \gamma_2 = \gamma_1 + h_1 \frac{n_2 - n_1}{r_1} = 0,0163.$$

В формуле (13,19) заменим  $\alpha$  на  $\gamma$ :

$$h_{k+1} = h_k - \frac{\gamma_{k+1} d_k}{n_{k+1}},$$

иначе

$$h_2 = h_1 - \frac{\gamma_2 d_1}{n_2} = 39,946,$$

и, наконец,

$$\gamma_3 = \gamma_2 + h_2 \frac{n_3 - n_2}{r_2} = 0,5319.$$

Известное  $\gamma_3$  позволяет получить положение изображения. Так как

$$\frac{h_k}{s_k} = \alpha_{k+1}, \text{ то } s'_k = \frac{h_k n_{k+1}}{\gamma_{k+1}},$$

т. е.

$$s'_2 = 75,1 \text{ мм.}$$

Углы нулевого луча  $\alpha$  найдутся путем деления соответствующего  $\gamma$  на показатель преломления:  $\alpha_1 = -0,5$ ,  $\alpha_2 = 0,01075$ ,  $\alpha_3 = 0,5319$ .

Обычно принято приводить  $\alpha$  к последнему, равному 1, для чего необходимо все углы разделить на последний угол, т. е. получим окончательно  $\alpha_1 = -0,94$ ;  $\alpha_2 = 0,0202$ ;  $\alpha_3 = 1$ .

#### § 14. УРАВНЕНИЕ ГЮЙГЕНСА—ГЕЛЬМГОЛЬЦА

Пучок нулевых лучей, вышедший из точки  $A$  плоскости предмета  $P$  (рис. 12), после преломления поверхностью с радиусом кривизны  $r$  образует изображение в точке  $A'$ , плоскости изображения  $P'$ .

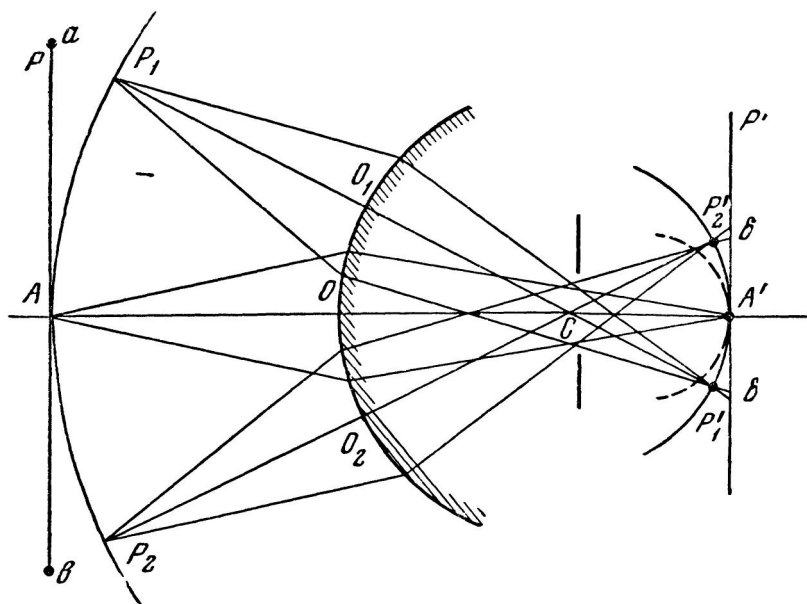


Рис 12 Образование изображения одной сферической поверхностью

Рассмотрим образование гомоцентрическими пучками лучей точек изображения, удаленных от оптической оси.

Повернем условно оптическую ось  $AOC$  вокруг центра кривизны поверхности  $C$  так, чтобы она последовательно занимала



положения  $P_1P'_1$  и  $P_2P'_2$ . Поверхность предметов представлена дугой  $P_1AP_2$ , а поверхность изображения дугой  $P'_1A'P'_2$ .

Легко видеть, что изображение точек  $a$  и  $b$ , более удаленных от поверхности, чем точки  $P_1$  и  $P_2$ , будет находиться ближе к поверхности, например на дуге, показанной пунктиром.

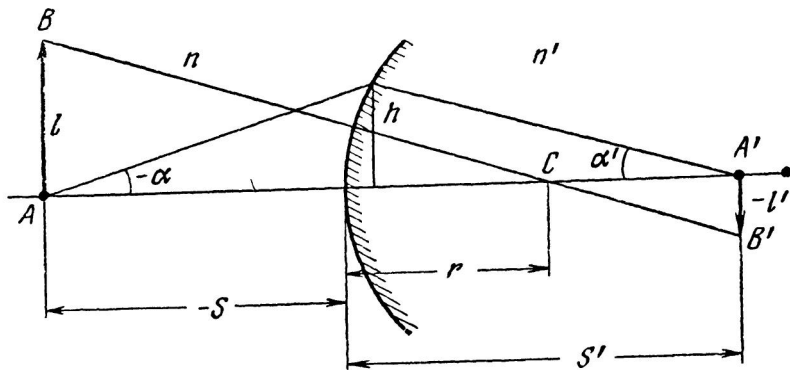


Рис 13 Образование точки вне оптической оси

Таким образом, плоская поверхность предметов  $P$  не может изображаться плоской поверхностью изображения  $P'$ , а изображения точек  $a$  и  $b$  будут представлены в плоскости  $P'$  в виде кружков рассеяния  $\delta$ .

Только изображения весьма небольшой части предметов вблизи точки  $A$ , расположенных перпендикулярно оптической оси, можно рассматривать в виде плоских перпендикулярных оптической оси изображений около точки  $A'$ .

В области нулевых лучей пренебрегают неспособностью сферической поверхности образовывать плоское изображение достаточных размеров и полагают, что любые пространства вне оптической оси изображаются сопряженными лучами в виде подобных же пространств: плоскость — в виде плоскости.

Из точки  $A$  (рис. 13) выходит луч под углом  $\alpha$  и после преломления на поверхности с радиусом кривизны  $r$  пересекает оптическую ось в точке  $A'$ . Точки  $A$  и  $A'$  есть точки сопряженные. Тогда плоскость предметов, содержащая  $l$ , должна быть оптически сопряжена с плоскостью изображений, содержащей  $l'$ .

Для определения величины изображения из точки  $B$  направим луч на преломляющую поверхность по ее радиусу. Этот луч пройдет через поверхность без преломления и в точке  $B'$  образует изображение.

Из подобия треугольников  $ABC$  и  $A'B'C$  следует

$$\frac{l'}{l} = \frac{r-s'}{r-s}.$$

Уравнение (13,9) можем представить в ином виде, приведя выражения в скобках к общему знаменателю:

$$n \left( \frac{s-r}{s} \right) = n' \left( \frac{s'-r}{s'} \right),$$

или

$$\frac{s'-r}{s-r} = \frac{ns'}{n's}.$$

Следовательно,

$$\frac{l'}{l} = \frac{ns'}{n's}, \quad (14,1)$$

где

$$s = \frac{h}{\alpha} \quad \text{и} \quad s' = \frac{h}{\alpha'}.$$

Подставляя  $s$  и  $s'$  в выражение (14,1) и сокращая на  $h$ , получим

$$n'l'\alpha' = n\alpha. \quad (14,2)$$

Это выражение имеет вид инварианта и называется уравнением Гюйгенса—Гельмгольца\*.

Так как для сложной системы  $l'_1 = l_2, \dots, l'_{k-1} = l_k; n'_1 = n_2, \dots, n'_{k-1} = n_k$  и  $\alpha'_1 = \alpha_2, \dots, \alpha'_{k-1} = \alpha_k$ , то можем написать

$$n_1 l_1 \alpha_1 = n_2 l_2 \alpha_2 = \dots = n_{k+1} l_{k+1} \alpha_{k+1}. \quad (14,3)$$

Произведение показателя преломления на ординату изображения и угол луча с осью в точке изображения на оптической оси для всех поверхностей системы является величиной постоянной.

**Пример 5.** Определить величину изображения, даваемого линзой с конструктивными элементами:  $r_1=40$ ;  $r_2=-40$ ;  $d=5$  и  $n=1,5163$ , если она освещает щель спектрального прибора с помощью источника света, расположенного от линзы на расстоянии 80 мм (условия примеров 3 и 4). Величина светового тела источника света 6 мм.

**Решение.** Воспользуемся данными, полученными в примере 4, т. е.

$$\alpha_1 = -0,94; n_1 = 1; \alpha_3 = 1; n_3 = 1.$$

Из формулы (12,3) следует

$$l_3 = \frac{n_1 l_1 \alpha_1}{n_3 \alpha_3}.$$

Величина предмета  $l_1=6$  мм, тогда

$$l_3 = -5,64 \text{ мм.}$$

\* До недавнего времени это уравнение называли уравнением Лагранжа — Гельмгольца.

## § 15. УГЛОВОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ

Угловым увеличением называется отношение тангенса угла в пространстве изображений, под которым луч выходит из оптической системы к оптической оси, к тангенсу сопряженного угла в пространстве предметов (рис. 13):

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \alpha'}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (15,1)$$

Уравнение (14,2) представим в виде

$$\frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{nl}{n'l'}.$$

Отношение  $l'$  к  $l$  есть линейное увеличение  $\beta$ . При малости углов  $\alpha$  и  $\alpha'$  можем написать

$$\gamma = \frac{n}{n'\beta},$$

или

$$\gamma = \frac{n_1}{n_{k+1}} \cdot \frac{1}{\beta}. \quad (15,2)$$

Угловое увеличение обратно пропорционально линейному и зависит от показателей преломления первой и последней оптических сред.

Следует отметить, что линейное увеличение принято определять с помощью углов нулевого луча с оптической осью, тогда на основании (15,2) имеем

$$\beta = \frac{n_{k+1}}{n_1} \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_{k+1}}. \quad (15,3)$$

Чаще всего оптическая система располагается в однородной среде (в воздухе), тогда  $n_{k+1} = n_1$ , а последний угол луча с осью принимается равным единице ( $\alpha_{k+1} = 1$ ), тогда  $\beta = \alpha_1$ .

Соответственные точки предмета и изображения, угловое увеличение в которых равно плюс единице, называются узловыми. Если оптическая система расположена в однородной среде, то узловые точки совпадают с главными.

## § 16. ПРЕЛОМЛЕНИЕ ЛУЧА ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

В оптических приборах часто применяются детали с плоскими преломляющими поверхностями.

К их числу относятся отражательные и преломляющие призмы, клинья, светофильтры, защитные стекла, сетки, зеркала с внутренним серебрением, плоско-выпуклые и плоско-вогнутые линзы и другие детали.

Плоские поверхности всегда тем или иным способом влияют на ход лучей в оптической системе.

Можно указать лишь на один случай, когда плоская поверхность не оказывает влияния на ход лучей—это случай, когда лучи падают параллельными пучками перпендикулярно к поверхности. Тогда они проходят ее без преломления, так как  $i=i'=0$ .

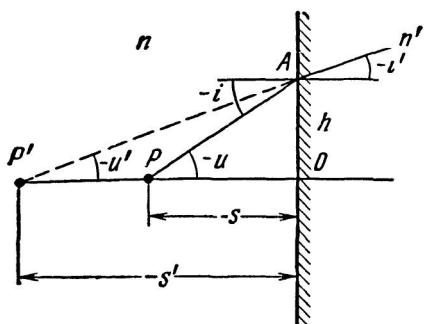


Рис. 14. Плоская преломляющая поверхность

Но в практике такие случаи весьма редки, так как оптические приборы имеют обычно определенное поле зрения, и, кроме пучков лучей, идущих параллельно оптической оси, существуют пучки, идущие под углом к оси.

Плоская поверхность с радиусом кривизны  $r=\infty$  (рис. 14) разделяет две оптические среды с показателями преломления  $n$  и  $n'$ . Предмет расположен в точке  $P$ . В точке  $P'$  расположено мнимое изображение.

Угол луча с осью  $u$  равен углу падения  $i$ , а угол  $u'$  после преломления равен углу преломления  $i'$ , определяемому из уравнения (6,1).

Из решения тр-ков  $AOP$  и  $AOP'$ , опирающихся на одну и ту же высоту  $h$ , имеем

$$s' = \frac{stgu}{tgu'} \quad (16,1)$$

Искомыми величинами являются  $u'$  и  $s'$ . Знание этих величин позволяет перейти к вычислению прохождения луча через следующую поверхность.

## § 17. ПРЕЛОМЛЕНИЕ ЛУЧА ЧЕРЕЗ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНУЮ ПЛАСТИНУ

Плоскопараллельной пластиной называется оптическая деталь круглой или какой-либо другой формы, ограниченная с двух сторон полированными плоскими поверхностями, параллельными друг

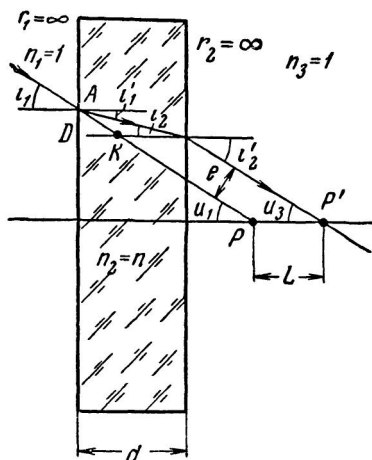


Рис 15. Преломление луча через плоскопараллельную пластинку

другу. Любая из нормалей к поверхности может быть оптической осью, однако обычно таковой бывает ось симметрии детали.

Пучок лучей, ограниченный лучом  $AP$  (рис. 15) и лучом, идущим по оптической оси, пересекается в точке  $P$ . Эта точка является точкой предмета для пластины. Луч, идущий по оптической оси, встретив пластину, проходит дальше без преломления. Луч  $AP$  в точке  $A$  преломляется и встречает вторую поверхность в точке  $B$ . После преломления на второй поверхности луч направляется в точку  $P'$ , где образует изображение точки  $P$ .

Нетрудно показать, что  $u_1 = u_3$ , т. е. луч при преломлении в пластинке не меняет своего направления, а лишь смещается. Действительно,  $i_1 = u_1$  и  $i'_1 = i_2$ . Тогда и  $i_1 = i'_2$ , а следовательно, и  $u_1 = u_3$ .

Отрезок  $PP'$  определяет величину смещения луча  $L$ . Из рис. 15  $L = DB - DK = d - AD \operatorname{ctg} i_1$ . Но  $AD = d \operatorname{tg} i'_1$ , тогда

$$L = d \left( 1 - \frac{\operatorname{tg} i'_1}{\operatorname{tg} i_1} \right). \quad (17,1)$$

Найдем предел этого отношения при  $i_1 \rightarrow 0$ :

$$\lim_{i_1 \rightarrow 0} \left( \frac{\operatorname{tg} i'_1}{\operatorname{tg} i_1} \right) = \frac{1}{n}.$$

Следовательно,

$$L_0 = \frac{n-1}{n} d. \quad (17,2)$$

Последнее уравнение есть уравнение смещения нулевого луча плоскопараллельной пластиной вдоль оптической оси.

Представляет интерес также величина поперечного смещения  $e$  луча, вышедшего из пластины, по отношению к падающему.

Из рис. 15 следует, что  $e = AB \sin(i_1 - i'_1)$ , но

$$AB = \frac{d}{\cos i'_1},$$

значит,

$$e = \frac{d \sin(i_1 - i'_1)}{\cos i'_1}.$$

После преобразования путем замены  $i'_1$  по уравнению (6,1) получим удобную формулу для определения  $e = f(d, n, i_1)$ :

$$e = d \sin i_1 \left( 1 - \frac{\cos i_1}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1}} \right). \quad (17,3)$$

Формула (17,3) устанавливает связь между поперечным смещением  $e$  и углом поворота пластины  $i_1$ .

Если пластина располагается в строго параллельном ходе лучей, то вызываемое ею смещение лучей в поперечном направлении и вдоль оптической оси не существенно.

Введение пластины в ход лучей оптического прибора, в область сходящихся или расходящихся пучков лучей, вызывает смещение изображения и нарушает ранее выполненную юстировку оптики прибора.

**Пример 6.** В зрительной трубе расстояние между объективом и окуляром составляет 185 мм. В это пространство понадобилось установить сетку (плоскопараллельную пластинку) толщиной 5 мм из стекла с показателем преломления  $n=1,5163$ . Определить необходимое новое расстояние между объективом и окуляром, сохраняющее то же состояние юстировки оптической системы, что и до введения сетки.

**Решение.** Определим величину смещения луча плоскопараллельной пластиной по формуле (17,2):

$$L_0 = \frac{n-1}{n} d = 1,7 \text{ мм.}$$

Новое расстояние между объективом и окуляром равно сумме старого и величине смещения  $L_0$ , т. е. 186,7 мм.

**Пример 7.** Качающаяся плоскопараллельная пластина установлена в ходе лучей микроскопа перед сеткой, в пространстве между объективом и окуляром. Пластина толщиной 6 мм из стекла с  $n=1,5688$  наклонена к оптической оси под углом  $30^\circ$ . Определить величину поперечного смещения луча.

**Решение.** Применим формулу (17,3), зная, что  $i_1=30^\circ$ , тогда  $e=1,25 \text{ мм}$ .

## § 18. ПРЕЛОМЛЕНИЕ ЛУЧА ЧЕРЕЗ КЛИН

Оптическая деталь, ограниченная с двух сторон преломляющими плоскими поверхностями, составляющими друг с другом некоторый угол, называется *преломляющей призмой*.

*Клин* называется призма, ограниченная двумя преломляющими плоскостями с малым углом между ними.

Клинья применяются в приборах для измерения углов (дальномеры), для юстировки оптических систем, для сведения окулярных осей и для решения других задач.

Под малым преломляющим углом понимается угол не более  $6^\circ$ .

Из рис. 16 легко установить зависимость между преломляющим углом  $\sigma$  и углом отклонения  $\omega$ .

Принимая  $\sin \sigma = \sigma$  и зная, что  $i_2 = \sigma$ , получим

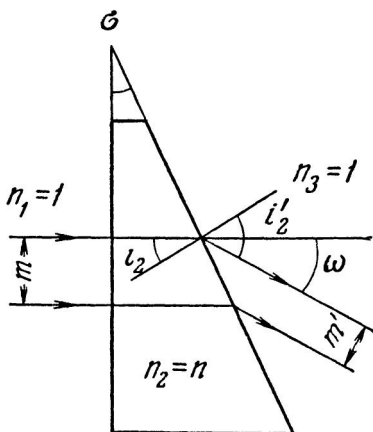


Рис. 16. Клин

$$\omega = (n - 1) \sigma. \quad (18,1)$$

Для определения дисперсии клина в эту формулу подставим вместо  $n$  показатели преломления различных длин волн, тогда для лучей спектра  $F$  и  $C$  будем иметь

$$d\omega = \omega_F - \omega_C = (n_F - 1)\sigma - (n_C - 1)\sigma.$$

После преобразования

$$d\omega = (n_F - n_C)\sigma, \quad (18,2)$$

или в общем случае

$$d\omega = (n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2})\sigma. \quad (18,3)$$

При прохождении лучей через клин происходит сжатие пучка. Если перед клином размер пучка  $m$  (рис. 16), то после преломления его размер  $m'$ .

Степень сжатия пучка определяется коэффициентом *анаморфирования* или коэффициентом *трансформирования* (более подробно см. § 52), который для призмы или системы призм выражается уравнением

$$A = \prod_{k=1}^{k=m} \frac{\cos i_k}{\cos i'_k}. \quad (18,4)$$

**Пример 8.** Определить угол отклонения и угловую дисперсию клина с преломляющим углом  $6^\circ$  из оптического стекла марки К8.

**Решение.** Из каталога оптического стекла для марки К8 имеем:  $n_D = 1,5163$ ,  $n_F = 1,52195$ ,  $n_C = 1,51389$ .

Угол отклонения найдем по формуле (18,1)

$$\omega = 0,05421.$$

<sup>1</sup> Угловая дисперсия, согласно (18,2),

$$d\omega = 0,000846.$$

Таким образом,  $\omega = 3^\circ 06' 20''$ ,  $d\omega = 0^\circ 02' 14''$ .

## § 19. ПРЕЛОМЛЕНИЕ ЛУЧА НЕСФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Применение несферических поверхностей в оптических системах открывает новые возможности для достижения высокого качества изображения. Такие поверхности применяются в конденсорах для проекции и микроскопии, в фотографических объективах, в прожекторах и других приборах. Наиболее часто применяются параболические, эллиптические, гиперболические поверхности. Применяются и поверхности, удовлетворяющие уравнениям высшего порядка.

При определении положения изображения в параксиальной области несферические поверхности заменяют сферическими, но определение хода действительного луча в меридиональной плоскости требует особого метода вычисления.

Допустим, что кривая несферической поверхности с радиусом кривизны  $r_k$  в данной точке определяется уравнением  $x=f(y)$ , выраженным в прямоугольных координатах с центром в вершине несферической поверхности.

Несферическая поверхность с вершиной  $O_k$  расположена среди сферических поверхностей на расстоянии от последних  $d_{k-1}$  и  $d_k$  (рис. 17).

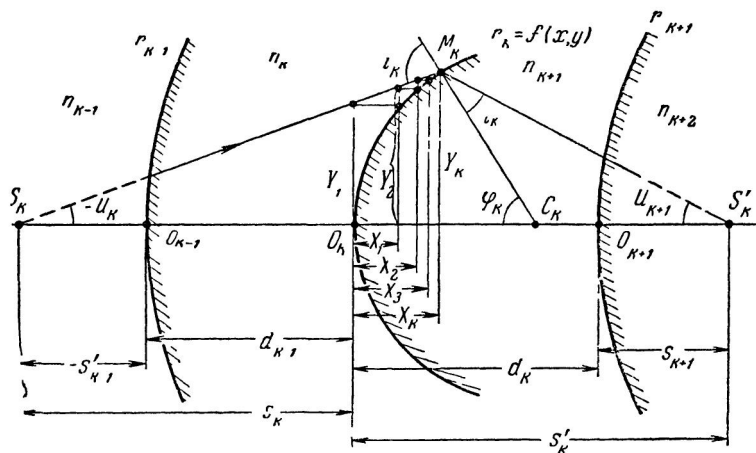


Рис. 17. Несферическая поверхность

Вычисление действительного луча в меридиональной плоскости через сферические поверхности производится по обычным схемам. Луч света  $S_k M_k$  по выходе из поверхности с вершиной  $O_{k-1}$  имеет параметры  $u_k$  и  $s'_{k-1}$ .

Для несферической поверхности, заданной уравнением  $x=f(y)$ , начальными параметрами являются  $u_k$  и  $s_k = s'_{k-1} - d_{k-1}$ . Примем для анализа вид уравнения несферической поверхности

$$x = Ay^2 + By^4 + Cy^6 + Dy^8 + Ey^{10} + Fy^{12}.$$

Основным содержанием метода вычисления луча через несферическую поверхность является отыскание точки встречи луча несферической поверхности путем определения  $y$ , остающегося практически неизменными при изменении  $x$ .

Из рис. 17 следует

$$y_1 = s_k \operatorname{tg} u_k. \quad (19,1)$$

Ординате  $y_1$  соответствует абсцисса  $x_1$ , определяемая уравнением

$$x_1 = Ay_1^2 + By_1^4 + Cy_1^6 + Dy_1^8 + Ey_1^{10} + Fy_1^{12}. \quad (19,2)$$



Высоты луча, соответствующие абсциссам  $x$ , определяются из выражений:

$$\begin{aligned} y_2 &= y_1 - x_1 \operatorname{tg} u_k, \\ y_3 &= y_1 - x_2 \operatorname{tg} u_k, \\ y_4 &= y_1 - x_3 \operatorname{tg} u_k \text{ и т. д.} \end{aligned} \quad (19,3)$$

Величины  $x_2, x_3$  и т. д., соответствующие ординатам  $y_2, y_3$  и т. д., определяются по уравнениям, аналогичным уравнению (19,2), до тех пор, пока величина  $y_k$  практически не окажется неизменной.

Практика вычислений показывает, что для шестичленного уравнения необходимое приближение достигается на 4-й или 5-й вариант расчета.

После отыскания точки встречи луча с поверхностью в виде ординаты  $y_k$  и абсциссы  $x_k$  определяется тангенс угла между оптической осью и касательной в точке встречи через первую производную. В нашем случае, учитывая вид уравнения  $x=f(y)$ , будем иметь

$$\operatorname{tg} \varphi_k = 2Ay_k + 4By_k^3 + 6Cy_k^5 + 8Dy_k^7 + 10Ey_k^9 + 12Fy_k^{11}. \quad (19,4)$$

Из треугольника  $S_k M_k C_k$  находим

$$i_k = u_k - \varphi_k. \quad (19,5)$$

Угол преломления находим из оптического инварианта

$$\sin i'_k = \frac{n_k \sin i_k}{n_{k+1}}. \quad (19,6)$$

Из треугольника  $S_k M_k S'_k$  находим угол  $u_{k+1}$ :

$$u_{k+1} = \varphi_k + i'_k,$$

и, наконец,

$$s'_k = x_k + \frac{y_k}{\operatorname{tg} u_{k+1}}. \quad (19,7)$$

Затем производится вычисление луча по обычным формулам сферической поверхности, для чего находим

$$s_{k+1} = s'_k - d_k.$$

Величины  $s_{k+1}$  и  $u_{k+1}$  являются начальными параметрами для последующего вычисления через сферические поверхности.

Вычисление луча по формулам (19,1)—(19,7) удобно выполнять по схеме 1.

Для изготовления несферических поверхностей известно много способов, а для контроля качества их изготовления уже применяются интерференционные методы, что позволит в ближайшем будущем широко применять несферические поверхности в оптических приборах.

## § 20. ПРЕЛОМЛЕНИЕ ЛУЧА ЧЕРЕЗ ЛИНЗУ

Линза с радиусами кривизны поверхностей  $r_1$  и  $r_2$  (рис. 18), толщиной  $d$ , из стекла с показателем преломления  $n$  образует изображение бесконечно удаленной точки, расположенной на оптической оси линзы в точке  $F'$ , точке заднего фокуса. Определим фокусные расстояния и положения главных плоскостей в линзе.

Воспользуемся формулами (12,1), (13,15) и (13,19):

$$f' = \frac{h_1}{\alpha_3}, \quad \alpha_3 = \frac{n_2}{n_3} \alpha_2 + \frac{h_2(h_3 - h_2)}{r_2 n_3} \quad \text{и} \quad h_2 = h_1 - \alpha_2 d_1.$$

В нашем случае  $n_1 = n_3 = 1$ ,  $n_2 = n$  и  $\alpha_1 = 0$ . Примем  $h_1 = r$ , тогда, подставив эти выражения в уравнение для  $\alpha_3$ , окончательно получим

$$\frac{1}{f'} = (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{d(n-1)^2}{nr_1 r_2}. \quad (20,1)$$

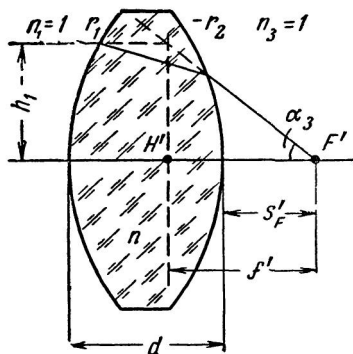


Рис. 18. Линза

Заднее вершинное фокусное расстояние  $s'_F$  найдется из выражения

$$\alpha_3 = \frac{h_2}{s'_F},$$

т. е. с учетом  $h_2 = r_1 - \alpha_2 d$

$$s'_F = f' \left[ 1 - \frac{(n-1)d}{nr_1} \right], \quad (20,2)$$

и переднее вершинное фокусное расстояние аналогично

$$s_F = f' \left[ 1 + \frac{(n-1)d}{nr_2} \right]. \quad (20,3)$$

Положение главных плоскостей  $s_H$  и  $s'_H$  найдется из выражений  $s_H = s_F - f$  и  $s'_H = s'_F - f'$ , т. е.

$$s_H = - \frac{f'(n-1)d}{nr_2} \quad (20,4)$$

и

$$s'_H = - \frac{f'(n-1)d}{nr_1}. \quad (20,5)$$

**Пример 9.** Найти фокусное расстояние, вершинные фокусные расстояния и положения главных плоскостей линзы, имеющей конструктивные элементы:  $r_1 = 17,58$  мм,  $r_2 = -21,03$  мм,  $d = 5$  мм,  $n = 1,5467$ .

**Решение.** Применив формулу (20,1), получим

$$\frac{1}{f'} = 0,054495,$$

$$-f = f' = 18,35 \text{ мм.}$$

Вершинные расстояния найдем по формулам (20,2) и (20,3)

$$s'_F = 16,57 \text{ мм, } s_F = -16,81 \text{ мм.}$$

Схема 1

Схема вычисления луча через линзу с несферической поверхностью, заданной уравнением вида:

$$x = Ay^2 + By^4 + Cy^6 + Ey^8 + Fy^{10} + Gy^{12}.$$

$$r_1 = f(x, y) \quad n_1$$

Дано:  $d_1 \quad n_2 \quad s_1, u_1; \quad s'_0, \beta.$

$$r_2 = \infty$$

$$n_3$$

$2 \lg y_1$	$2 \lg y_2$	$2 \lg y_3$	$\lg y_4$	$\lg \sin u_1$
$\lg A$	$\lg A$	$\lg A$	$\lg 2$	$\lg(n_1 \quad n_2)$
$\lg a_1$	$\lg a_2$	$\lg a_3$	$\lg \rho$	$\lg \sin i'_1$
$4 \lg y_1$	$4 \lg y_2$	$4 \lg y_3$	$3 \lg y_4$	$i'_1$
$\lg B$	$\lg B$	$\lg B$	$\lg 4$	$\Phi_1$
$\lg b_1$	$\lg b_2$	$\lg b_3$	$\lg B$	$u_2$
$6 \lg y_1$	$6 \lg y_2$	$6 \lg y_3$	$\lg q$	$\lg y_4$
$\lg C$	$\lg C$	$\lg C$	$5 \lg y_4$	$\text{clg tg } u_2$
$\lg c_1$	$\lg c_2$	$\lg c_3$	$\lg 6$	$\lg m$
$8 \lg y_1$	$8 \lg y_2$	$8 \lg y_3$	$\lg C$	$m$
$\lg E$	$\lg E$	$\lg E$	$\lg t$	$x_1$
$\lg e_1$	$\lg e_2$	$\lg e_3$	$7 \lg y_4$	$s_1$
$10 \lg y_1$	$10 \lg y_2$	$10 \lg y_3$	$\lg 8$	$-d_1$
$\lg F$	$\lg F$	$\lg F$	$\lg E$	$s_2$
$\lg f_1$	$\lg f_2$	$\lg f_3$	$\lg \theta$	
$12 \lg y_1$	$12 \lg y_2$	$12 \lg y_3$	$9 \lg y_1$	$\lg \sin u_2$
$\lg G$	$\lg G$	$\lg G$	$\lg 10$	$\lg(n_2 \quad n_3)$
$\lg g_1$	$\lg g_2$	$\lg g_3$	$\lg F$	$\lg \sin u_3$
$a_1$	$a_2$	$a_3$	$\lg w$	$\lg s_2$
$b_1$	$b_2$	$b_3$	$11 \lg y_4$	$\lg \lg u_2$
$c_1$	$c_2$	$c_3$	$\lg 12$	$\text{clg tg } u_3$
$e_1$	$e_2$	$e_3$	$\lg G$	$\lg s_2$
$f_1$	$f_2$	$f_3$	$\lg z$	$s'_2$
$g_1$	$g_2$	$g_3$	$\rho$	$-s'_0$
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$q$	$\delta s'$
			$i$	
			$\theta$	
$\lg s_1$	$\lg x_1$	$\lg x_2$	$w$	$\lg \sin u_2$
$\lg \text{tg } u_1$	$\lg \text{tg } u_1$	$\lg \text{tg } u_1$	$z$	$\text{clg } \sin u_3$
$\lg y_1$	$\lg \Delta y_1$	$\lg \Delta y_2$	$\text{tg } \Phi_1$	$\lg \beta'$
	$y_1$	$y_1$	$u_1$	$\beta'$
	$-\Delta y_1$	$\Delta y_2$	$-\Phi_1$	$-\beta$
	$y_2$	$y_3$	$i_1$	$\delta\beta$
		$y_4$		

Положения главных плоскостей могут быть найдены как разности вершинных и фокусных расстояний:

$$-s'_H - f' - s'_F = 1,78 \text{ мм}; s_H = -f + s_F = 1,54 \text{ мм}.$$

## § 21. ТИПЫ ЛИНЗ

Линза есть оптическая деталь, ограниченная двумя преломляющими поверхностями, являющимися поверхностями тел вращения. Все линзы можно разделить на три группы.

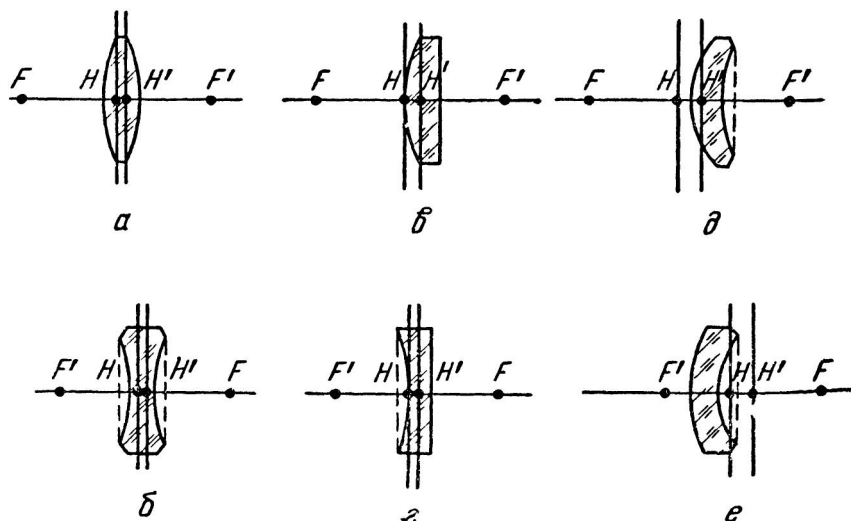


Рис. 19. Типы линз

1. Линзы, имеющие различные знаки радиусов кривизны поверхностей (би-форма). К таким линзам относятся *двояковыпуклые* и *двояковогнутые* линзы (рис. 19, а, б).

2. Линзы, имеющие одну из поверхностей плоской (план-форма). Такие линзы называются *плоско-выпуклыми* или *плоско-вогнутыми* (рис. 19, в, г).

3. Линзы, имеющие одинаковые знаки радиусов кривизны поверхностей. Такие линзы называют *менисками* (выпукло-вогнутыми или вогнуто-выпуклыми) (рис. 19, д, е).

На рис. 19 показаны положения главных точек и точек главных фокусов. У всех линз передняя главная плоскость находится перед задней.

Фокусные расстояния линз и положения главных плоскостей можно вычислить по формулам (20,1—20,5). С конструктивной стороны каждая линза характеризуется радиусами кривизны поверхностей  $r_1$  и  $r_2$ , толщиной  $d$  и показателем преломления  $n$ . Положительные линзы обычно толще в середине, а отрицательные —

на краю. Поэтому малая толщина линз по краю характерна для положительных линз.

Если толщина линзы слишком мала, то сферические поверхности образуют острый край. Такая линза называется линзой с острым краем. Ее диаметр можно найти по формуле

$$D_{\text{ок}} = 2 \sqrt{2r_1 h_1 - h_1^2}, \quad (21,1)$$

где  $h_1$  — стрелка прогиба поверхности;

$$h_1 = \frac{d^2 + 2r_2 d}{2(d - r_1 + r_2)}. \quad (21,2)$$

Рассмотрим некоторые виды линз.

Линза с равными радиусами разных знаков. В формулу (20,1) подставим  $r_1 = -r_2 = r$ :

$$\frac{1}{f'} = \frac{2(n-1)}{r} - \frac{(n-1)^2 d}{nr^2}$$

и окончательно

$$\frac{1}{f'} = \frac{n-1}{nr^2} (2nr - nd + d). \quad (21,3)$$

Такая линза может быть двояковыпуклой или двояковогнутой.

Линза с одной плоской поверхностью. Подставив в формулу (20,1)  $r_2 = \infty$ , получим

$$\frac{1}{f'} = \frac{n-1}{r}. \quad (21,4)$$

В этом случае знак радиуса определяет знак фокусного расстояния. Формула (21,4) называется формулой плоско-выпуклой (или плоско-вогнутой) линзы.

Линза-шар. В шаровой линзе  $r_1 = -r_2 = r$ , и толщина линзы  $d = 2r$ . Подставив эти значения в формулу (20,1), получим

$$\frac{1}{f'} = \frac{2(n-1)}{nr}. \quad (21,5)$$

Линза с равными радиусами одинаковых знаков. Такая линза относится к группе менисков. Подставив в формулу (20,1)  $r_1 = r_2 = r$ , получим

$$\frac{1}{f'} = \frac{(n-1)^2 d}{nr^2}. \quad (21,6)$$

Концентрическая линза. Концентрической линзой называется такая линза, у которой центры кривизны поверхностей находятся в одной точке. Такая линза обладает свойством пропускать лучи света без преломления, если они направляются в центр кривизны. Она относится к группе менисков. Ее фокусное

расстояние всегда отрицательно. Формулу (20,1) преобразуем, подставив вместо  $d$  равную ей величину  $r_1 - r_2$ :

$$\frac{1}{f'} = \frac{(n-1)(r_2 - r_1)}{r_1 r_2} + \frac{(n-1)^2 (r_1 - r_2)}{n r_1 r_2},$$

или

$$\frac{1}{f'} = \frac{(n-1)(r_2 - r_1)}{n r_1 r_2}$$

и, наконец,

$$\frac{1}{f'} = \frac{n-1}{n} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (21,7)$$

**Телескопическая линза.** Телескопической линзой называется линза, фокусное расстояние которой равно бесконечности. Отсюда следует, что луч, направляющийся в линзу параллельно оптической оси, по выходе из линзы также идет параллельно оптической оси. Чтобы выполнить это условие, в формуле линзы (20,1) следует положить

$$(n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = - \frac{(n-1)^2 d}{n r_1 r_2}.$$

В этом случае получим

$$r_2 = r_1 - \frac{(n-1)d}{n}. \quad (21,8)$$

Если необходимо найти толщину линзы, удовлетворяющую условию фокусного расстояния, равного бесконечности, то при данных радиусах кривизны будем иметь

$$d = \frac{(r_1 - r_2)n}{n-1}. \quad (21,9)$$

**Линза относится к группе менисков.**

**Гиперболическая линза.** Гиперболической линзой называется линза, у которой одна или обе поверхности являются гиперболическими. Наиболее часто применяется положительная плоско-выпуклая линза, позволяющая получить гомоцентрический пучок лучей для бесконечно удаленной точки на оси оптической системы.

Уравнение поверхности определяется выражением

$$y^2 = x^2(n^2 - 1) - 2x(n-1)f'. \quad (21,10)$$

Такая линза своей плоской поверхностью обращена к предмету ( $x$  — отрицателен).

**Сферо-эллиптическая линза.** Эллиптической линзой называется линза, у которой имеющаяся одна или обе поверхности являются эллиптическими. Такая линза также позволяет получить гомоцентрический пучок лучей в пространстве изображе-

ний, аналогично гиперболической линзе, но она обращена своей выпуклой эллиптической поверхностью к предмету. Вторая поверхность делается концентрической по отношению к точке заднего фокуса.

Если толщина линзы  $d$ , а заднее вершинное фокусное расстояние  $s'_F$ , то уравнение поверхности имеет следующий вид:

$$y^2 = 2(s'_F + d)x \frac{n-1}{n} - x^2 \left( \frac{n^2-1}{n^2} \right) \quad (21,11)$$

и

$$r_2 = s'_F. \quad (21,12)$$

Линза относится к группе менисков.

**Пример 10.** Определить диаметр линзы до острого края, если радиус кривизны первой поверхности  $r_1=40$  мм, второй —  $r_2=-60$  мм, а толщина  $d=6$  мм.

**Решение.** Применим формулы (21,2) и (21,1), тогда

$$h_1 = 3,64 \text{ мм}, D_{\text{ок}} = 33,34 \text{ мм}.$$

**Пример 11.** Найти фокусное расстояние концентрической линзы с радиусами кривизны 35 и 30 мм из стекла с показателем преломления  $n=1,52$ .

**Решение.** Применив формулу (21,7), получим

$$f' = \frac{nr_1r_2}{(n-1)(r_2-r_1)} = -613,84 \text{ мм}.$$

---

## ОБЩИЕ СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

## § 22. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКОГО ПРИБОРА

С помощью оптических приборов человек может изменять масштаб и освещенность изображений предметов, а также изменять их цвета. Однако оптические системы не позволяют безгранично увеличивать пределы и возможности наблюдения. Прежде всего, оправы оптических деталей ограничивают прохождение пучков лучей в прибор, а размеры изображения определяются возможностями оптической системы образовывать хорошее или удовлетворительное по резкости изображение. Главными оптическими характеристиками приборов являются: 1) увеличение (масштаб изображения), 2) освещенность изображения (светосила), 3) поле зрения.

*Масштаб изображения* зависит от фокусного расстояния системы или от расстояния между предметом и системой. *Освещенность изображения* зависит от яркости предмета, от диаметров диафрагм, ограничивающих светопропускание, и от потерь света в приборе. *Поле зрения* ограничивается размерами диафрагм и величиной достаточно резкого изображения.

## § 23. ВИДИМОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ

*Видимым увеличением* называется отношение тангенса угла, под которым глаз наблюдателя видит изображение, образованное оптической системой, к тангенсу угла, под которым предмет виден невооруженным глазом (рис. 20):

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \gamma'}{\operatorname{tg} \gamma}. \quad (23,1)$$

Если это отношение положительно, то оптическая система образует прямое изображение. На это указывает одинаковость зна-



ков  $\gamma$  и  $\gamma'$ . Перевернутое (обратное) изображение оптической системы характеризуется различными по знаку углами  $\gamma$  и  $\gamma'$ , следовательно, и величина видимого увеличения будет отрицательна. Однако на практике пренебрегают знаком видимого увеличения и оно всегда считается положительным, а вид изображения, прямое или обратное, оговаривается особо.

Глаз наблюдателя (рис. 20), помещенный в точку  $B$ , видит предмет  $l$  под углом  $\gamma$ , а изображение  $l'$  этого предмета, образованное оптической системой, наблюдает с расстояния  $k'$  под углом  $\gamma'$ . При положении предмета в бесконечности

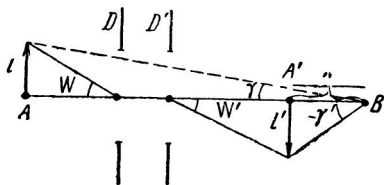


Рис. 20. К выводу формулы видимого увеличения

$$l' = f' \operatorname{tg} \omega',$$

но одновременно

$$l' = k' \operatorname{tg} \gamma'.$$

Если оптическая система расположена в однородной среде и  $\omega \cong \omega'$ , а угол  $\gamma$  практически мало отличается от  $\omega$ , тогда

$$f' \operatorname{tg} \gamma = k' \operatorname{tg} \gamma'$$

и

$$\Gamma = \frac{f'}{k'}. \quad (23,2)$$

Последнее уравнение указывает на условие *естественной перспективы*. Чтобы  $\Gamma=1$  (или  $\Gamma=-1$ ),  $k'$  должно быть равным  $f'$ , т. е. при наблюдении снимка необходимо помещать глаз перед снимком на расстоянии, равном фокусному расстоянию съемочного объектива.

Для фотографических объективов вместо видимого увеличения применяют масштаб изображения. Масштаб изображения определяется отношением фокусного расстояния объектива к расстоянию от объектива до предмета. Масштаб изображения принято обозначать следующим образом: 1 : 10 000, 1 : 25 000 и т. д.

Для других оптических систем, например для репродукционных объективов, проекционных систем и т. п., вместо видимого увеличения рассматривается отношение величины изображения к величине предмета. Для многих систем в таких случаях формула линейного увеличения заменяет формулу видимого увеличения.

## § 24. ОСНОВНЫЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОНЯТИЯ

Светом, или *оптическим излучением*, называется электромагнитное излучение, характеризующееся длинами световых волн, расположенными в диапазоне от 0,01 нм до 1 см.

Та часть излучения, которая воспринимается глазом человека, называется *видимым* излучением. Глаз способен воспринимать свет в диапазоне длин волн от 380 до 770 нм.

Источник света испускает в пространство энергию излучения, которая оценивается и количественно и качественно. Основными фотометрическими величинами видимого излучения являются: сила света ( $I$ ), яркость ( $B$ ), световой поток ( $F$ ), освещенность ( $E$ ), светность ( $R$ ).

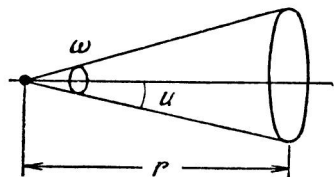


Рис. 21. Телесный угол

Основной единицей фотометрических величин является единица силы света 1 свеча ( $св$ ). Все остальные световые единицы являются производными от основной величины.

Световым эталоном силы света служит так называемый полный излучатель в виде специального сосуда с отверстием, которое светится как черное тело. В этом сосуде имеется блок из платины, которая разогревается до температуры затвердевания. Отверстие этого сосуда рассматривается как плоская площадка, дающая 60  $св$  с 1  $см^2$ , или, точнее, одну свечу с площади  $16,667 \cdot 10^{-7} м^2$  в перпендикулярном к ней направлении, причем сила света рассматривается на таких расстояниях, на которых размерами площади излучателя можно пренебречь. Достоинством такого источника света является его хорошая воспроизводимость. Эталон силы света хранится во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии.

*Яркостью*  $B$  называется поверхностная плотность силы света в заданном направлении  $I_i$ , равная отношению силы света к площади проекции светящейся поверхности  $S_i$  на плоскость, перпендикулярную к тому же направлению:

$$B = \frac{I_i}{S_i}, \quad (24,1)$$

или, с учетом угла наклона  $i$ , светящейся поверхности к направлению луча:

$$B = \frac{I_i}{S \cos i}, \quad (24,2)$$

где  $S$  — площадь светящейся поверхности.

Единица яркости нит ( $нт$ ) — это яркость предельно малой, одинаково во всех точках светящейся поверхности, для которой отношение силы света (в свечах) к ее площади (в квадратных метрах) равно единице, причем яркость и сила света определяются в перпендикулярном направлении к этой поверхности:

$$1 \text{ нт} = \frac{k \cdot 1 \text{ св}}{k \cdot 1 \text{ м}^2},$$

где  $k$  — произвольный предельно малый множитель.

Наиболее часто встречающиеся яркости приведены в табл. 3 в приложении.

Под световым потоком  $F$  понимают среднюю мощность оптического излучения за время, значительно большее периода световых колебаний. Источник света с силой  $I$  св излучает в окружающее пространство световой поток, равный

$$F_0 = 4\pi I. \quad (24,3)$$

Здесь  $4\pi$  есть полный телесный угол  $\omega$ .

Если световой поток ограничен конусом, в вершине которого расположен источник света, а основанием является освещаемая площадка или отверстие в оптической системе, то

$$F = \omega I, \quad (24,4)$$

где  $\omega$  — телесный угол (рис. 21), вырезающий из центра сферы с радиусом кривизны  $r$  на ее поверхности некоторую площадь  $S$ :

$$\omega = \frac{S}{r^2}. \quad (24,5)$$

Единицей телесного угла является стерадиан (*стер*). Одним стерадианом называется телесный угол, вырезающий из центра сферы на ее поверхности с радиусом кривизны  $r$  площадь  $S$ , равную квадрату радиуса этой сферы.

Зависимость между телесным углом  $\omega$  и плоским  $u$  определяется соотношением

$$\omega = 2\pi (1 - \cos u). \quad (24,6)$$

Единицей светового потока является люмен (*лм*). Один люмен равен световому потоку, испускаемому источником света с силой в 1 св в пределах телесного угла в 1 *стер*

$$1 \text{ лм} = 1 \text{ стер} \times 1 \text{ св}.$$

*Освещенностью* поверхности  $E$  называют поверхностную плотность светового потока излучения, равную отношению падающего на поверхность светового потока к площади освещаемой поверхности  $S$ :

$$E = \frac{F}{S}. \quad (24,7)$$

Единицей освещенности является люкс (*лк*). Один люкс есть освещенность поверхности в  $1 \text{ м}^2$ , на которую равномерно распределяется световой поток в 1 *лм*:

$$1 \text{ лк} = 1 \text{ лм} : 1 \text{ м}^2.$$

Подставим (24,4) и (24,5) в (24,7), тогда получим

$$E = \frac{I}{r^2}. \quad (24,8)$$

Если освещаемая площадка расположена под углом  $i$  к направлению луча, то

$$E = \frac{I \cos i}{r^2} \quad (24,9)$$

(закон косинусов для освещенности поверхности).

Между освещенностью и яркостью одной и той же идеально рассеивающей поверхности существует зависимость

$$B = \frac{\rho E}{\pi}, \quad (24,10)$$

где  $\rho$  — коэффициент отражения освещаемой поверхности. В кинематографии яркость освещенной поверхности (например, экрана) принято определять в апостильбах ( $асб$ ). Один апостильб есть яркость белой поверхности, на которой создана освещенность в один люкс ( $1 асб = 0,318 нт$ ).

Светностью  $R$  называется поверхностная плотность светового потока излучения, равная отношению светового потока к площади светящейся поверхности:

$$R = \frac{F_p}{S}. \quad (24,11)$$

Между падающим на поверхность световым потоком и отраженным  $E_p$  существует зависимость

$$F_p = \rho F, \quad (24,12)$$

где  $\rho$  — коэффициент отражения.

Единицей светности является люмен на квадратный метр — это светность одинаково во всех точках светящейся плоской поверхности, которая испускает в одну сторону световой поток в один люмен с площади в один квадратный метр:

$$1 \text{ лм/м}^2 = 1 \text{ лм} : 1 \text{ м}^2.$$

**Пример 12.** Определить яркость кратера дуговой лампы прожектора, если сила света по оси равна 100 000 свечей, а диаметр кратера равен 12 мм.

**Решение.** Площадь светового тела

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = 0,000113 \text{ м}^2$$

и, далее,

$$B = \frac{I}{S} = 8,85 \cdot 10^8 \text{ нт}.$$

**Пример 13.** Определить яркость листа белой бумаги с коэффициентом отражения 0,8, на которой создана освещенность в 200 лк.

Решение. Применив формулу (24,10), получим

$$B = 50,9 \text{ мт.}$$

### § 25. ПОТЕРИ СВЕТА

Световой поток, падающий в оптическую систему, состоящую из преломляющих и отражающих поверхностей, не весь проходит через нее. Яркость пучков лучей, проходящих через преломляющие и отражающие поверхности оптических деталей, составляющих прибор, ослабляется в связи с тем, что часть световых лучей поглощается массой стекла и отражается при переходе от одной среды к другой. Отношение потока излучения, пропущенного данным телом, к потоку излучения, упавшего на него, называется *коэффициентом пропускания*  $\tau$ .

Та часть световой энергии, которая поглощается массой стекла, определяется коэффициентом поглощения  $\alpha$ . *Коэффициентом поглощения* называется отношение потока излучения, поглощенного данным телом, к потоку излучения, упавшего на него:

$$\alpha = \frac{F_\alpha}{F} = 1 - \theta', \quad (25,1)$$

где  $F$  — начальный поток излучения;  $F_\alpha$  — поток излучения, поглощенный данным телом;  $l$  — длина пути луча в стекле, выраженная в сантиметрах. Величина  $\theta$  в оптике получила наименование *коэффициента прозрачности*. Оптическое стекло не является идеальной прозрачной средой. Внутри среды имеются материальные непрозрачные частицы, которые рассеивают свет и вызывают потери его на поглощение. Для современных сортов оптического стекла потеря света на поглощение характеризуется величиной 1% на 1 см хода луча в стекле, следовательно,  $\theta = 0,99$ .

Часть световой энергии, которая рассеивается на границе преломления или отражения, определяется коэффициентом отражения  $\rho$ . *Коэффициентом отражения* называется отношение потока излучения, отраженного данным телом, к потоку излучения, упавшего на него.

Потери света на отражение и поглощение в линзе схематически показаны на рис. 22.

Коэффициент отражения для случая двух прозрачных сред с идеально полированной поверхностью соприкосновения определяется по известной формуле Френеля

$$\rho = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(i - i')}{\sin^2(i + i')} + \frac{\text{tg}^2(i - i')}{\text{tg}^2(i + i')} \right]. \quad (25,2)$$

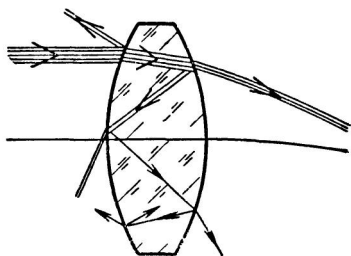


Рис. 22. Схема потерь света в линзе

Если угол падения равен нулю, то в этой формуле синусы и тангенсы углов можно заменить дугами, после чего, используя выражение  $ni = n'i'$ , получим

$$\rho = \frac{(n' - n)^2}{(n' + n)^2}. \quad (25,3)$$

Коэффициент пропускания для одной поверхности определяется формулой

$$\tau = 1 - \rho. \quad (25,4)$$

Общее пропускание света через оптическую систему, с учетом потерь света на поглощение и отражение, находится путем перемножения коэффициентов пропускания отдельных поверхностей с учетом коэффициентов поглощения, т. е.

$$\tau = \prod_{k=1}^{k=m} (1 - \rho_k) \prod_{k=1}^{k=m+1} \theta_k^l. \quad (25,5)$$

Величина  $\rho$  зависит от показателя преломления среды. Так, например, если  $1,5 < n < 1,57$ , то принимают  $\rho = 0,04$ , а если  $1,57 < n < 1,65$ , то  $\rho = 0,05$ . Для отражающих поверхностей (посеребрённых, алюминированных) достаточно принять  $\rho = 0,1$ .

Тогда можно написать приближенную формулу для подсчета пропускания света в случае отсутствия просветленных поверхностей:

$$\tau = 0,96^{N_1} \cdot 0,95^{N_2} \cdot 0,9^{N_3} \cdot 0,99^l, \quad (25,6)$$

где  $N_1$  — число преломлений на поверхностях, разделяющих воздух и стекло, с  $n < 1,57$ ;  $N_2$  — число преломляющих поверхностей, разделяющих воздух и стекло, с  $n > 1,57$ ;  $N_3$  — число отражающих поверхностей;  $l$  — длина хода луча в сантиметрах в стекле по оптической оси.

Потери света неприятны не только тем, что ослабляют освещенность изображения, но в особенности тем, что снижают контраст изображения. Свет, отраженный от поверхностей, частично возвращается обратно путем отражений от предыдущих поверхностей и, пройдя через поверхности оптической системы, образует вторичные изображения. Если эти вторичные изображения находятся вблизи основного изображения, то они могут настолько его испортить, что основное изображение будет непригодным для использования. Таким образом, свет, отраженный от поверхностей при преломлении, так же как и свет, рассеянный средой стекла, является светом вредным, и борьба с ним имеет важное значение.

Влияние рассеянного света на изображение принято характеризовать коэффициентом светорассеяния ( $s$ ), под которым принято понимать отношение освещенности образуемого объективом изображения черного предмета ( $E_T$ ), расположенного на равно-

мерно ярком фоне, к освещенности изображения яркого фона ( $E_c$ ), т. е.

$$s = \frac{E_T}{E_c}. \quad (25,7)$$

Так, например, современные фотографические объективы имеют  $s=0,03 \div 0,04$ .

В последнее время удалось значительно повысить прозрачность оптического стекла. В особенности значительные успехи достигнуты в области снижения потерь света на отражение путем просветления поверхностей. *Просветлением оптики* называется процесс уменьшения отражения света от поверхностей оптических деталей. Теоретические разработки сущности снижения потерь света методами просветления принадлежат нашим соотечественникам — академику И. В. Гребенчикову и А. Г. Власову. Просветление заключается в том, что на полированные поверхности оптических деталей наносят весьма тонкие прозрачные пленки. В этих тонких пленках происходит явление интерференции. Теория этого явления так же, как и теория цвета тонких пластинок в отраженном свете, известна из физической оптики. Толщина пленки приблизительно определяется по формуле

$$d = \frac{(2k + 1) \lambda}{4n}, \quad (25,8)$$

где  $\lambda$  — длина волны света, а  $k=0; 1; 2; 3$  и т. д.;  $n$  — показатель преломления пленки.

Показатель преломления пленки  $n_2$  находится из условия  $\rho_1 = \rho_2$ , так как необходимо, чтобы яркости обоих интерферирующих пучков были одинаковы. Из формулы (25,3) следует, что

$$\left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 = \left( \frac{n_0 - n_2}{n_3 + n_2} \right)^2.$$

Преобразуя, получим, что при  $n_1 = 1$

$$n_2 = \sqrt{n_3}. \quad (25,9)$$

В практике мы имеем дело со светом широкого спектрального состава, и лучи идут в систему под различными углами поля зрения, поэтому для таких пучков лучей оказывается невозможным полностью уничтожить потери света.

Различные методы, применяемые для просветления оптики, можно разбить на три группы:

1. Химическое взаимодействие стекла с растворами кислот и солей (химический метод).

2. Испарение и конденсация фторидов или других веществ в вакууме (физический метод).

3. Использование легкогидролизующихся растворов (метод гидролиза).

Просветление травлением водными растворами кислот создает прочную пленку и повышает химическую устойчивость стекла. Физическими методами достигаются хорошие результаты по просветлению, но проблема надежного упрочнения слоя еще не решена, в связи с чем применение этих методов не рекомендуется для просветления наружных поверхностей. Просветление на основе использования легкогидролизуемых соединений, в основном на базе ортокремниевой кислоты, создает прочный слой и позволяет применять многослойные пленки с хорошими показателями.

В табл. 1 приведены сравнительные данные результатов просветления различными методами. Коэффициент отражения одной поверхности до просветления находится в пределах от 0,04 до 0,055.

Просветление оптических приборов дает хорошие результаты и широко применяется. Например, просветление одного из фотографических объективов позволило увеличить светопропускание с 39 до 72%. В среднем можно считать, что просветление почти вдвое повышает пропускание света в оптических приборах и, кроме того, резко снижает действие рассеянного паразитного света.

Таблица 1

Метод	Коэффициент отражения в %		
	до просветления	после просветления	
Химический . . . . .	4,5—5,5	1,7—2,2	
Физический . . . . .	4,5—5,5	0,4—1,4	
Гидролизация {	однослойный . . . . .	—	0,8—2,5
	двухслойный . . . . .	4,5—5,5	1—1,2
	трехслойный . . . . .	—	0,2—0,6

Внедрение просветления в практику оптического приборостроения позволяет дать новую приближенную формулу коэффициента пропускания света:

$$\tau = 0,9^{N_4} \cdot 0,99^l \cdot 0,99^{N_4} \cdot 0,98^{N_5}, \quad (25,10)$$

где  $N_4$  — число поверхностей, просветленных физическим методом и методом гидролизации;  $N_5$  — число поверхностей, просветленных химическим методом.

**Пример 14.** Оптическая система состоит из зеркала с внутренним серебрением, из зеркала с внешним алюминированием, из трех непросветленных линз с показателем преломления  $n=1,54$ , свободно расположенных в воздухе, и двух ахроматических двухлинзовых склеенных объективов, просветленных химическим методом. Общая толщина оптического стекла по оптической оси со-



ставляет 67 мм (~7 см). Определить коэффициент пропускания света и потери света.

**Решение.** В нашем случае  $N_1=8$ ;  $N_3=1$ ;  $N_5=4$ ;  $l=7$ . На основании (25,6) и (25,10) составим формулу

$$\tau = 0,96^{N_1} \cdot 0,9^{N_3} \cdot 0,99^l \cdot 0,98^{N_5},$$

тогда получим

$$\tau = 0,96^8 \cdot 0,9 \cdot 0,99^7 \cdot 0,98^4 = 0,561,$$

т. е. потери составляют 43,9%.

## § 26. ДИАФРАГМЫ И ИХ ЗНАЧЕНИЕ

*Диафрагмами* называются непрозрачные экраны, имеющие отверстия для пропускания световых лучей.

Изображение оптической системы образуется при помощи пучков лучей, имеющих конечные размеры. Из каждой точки объекта в пространстве предметов по направлению к оптической системе выходят пучки лучей в пределах весьма больших телесных углов. Но в оптическую систему попадают лишь пучки лучей, ограниченные оправой оптических деталей. Оправы оптических деталей выполняют роль диафрагм.

Если на первую поверхность оптической системы, ограниченную оправой первой оптической детали, упал пучок лучей конечных размеров, то это еще не означает, что весь пучок лучей пройдет через всю оптическую систему. Внутри оптической системы могут существовать оправы других оптических деталей, которые ограничивают пучки световых лучей. Все эти оправы выполняют роль диафрагм. Но, кроме оправ линз и призм, естественно ограничивающих пучок световых лучей, могут быть и специальные диафрагмы. Диафрагмы, как правило, располагаются перпендикулярно оптической оси, а их центры совпадают с оптической осью системы.

Среди многих диафрагм, существующих в оптической системе, имеется одна, наиболее существенным образом влияющая на светопропускание, называемая действующей, или апертурной. *Апертурной диафрагмой* называется такая диафрагма, которая ограничивает осевой и наклонные пучки лучей, проходящие через оптическую систему.

Чтобы в реальной оптической системе отыскать местоположение апертурной диафрагмы, надо определить путь и конечные размеры пучка лучей, проходящего через оптическую систему в меридиональной плоскости. Здесь имеют значение только те лучи, которые действительно проходят через систему и дают изображение.

Найдем положение такой диафрагмы на примере сложной оптической системы из двух линз (рис. 23).

Из точки предмета  $B$  на оптическую систему падает пучок лучей сечения  $LBN$ , но через оптическую систему проходит только

пучок лучей сечения  $MVN$ . Лучи из точки  $B$  поступают в систему и выше точки  $M$ , но не проходят, так как срезаются задней частью оправы. Из системы могли бы выйти лучи и ниже точки  $N'$ , но этих лучей нет, так как их не пропускает передняя часть оправы.

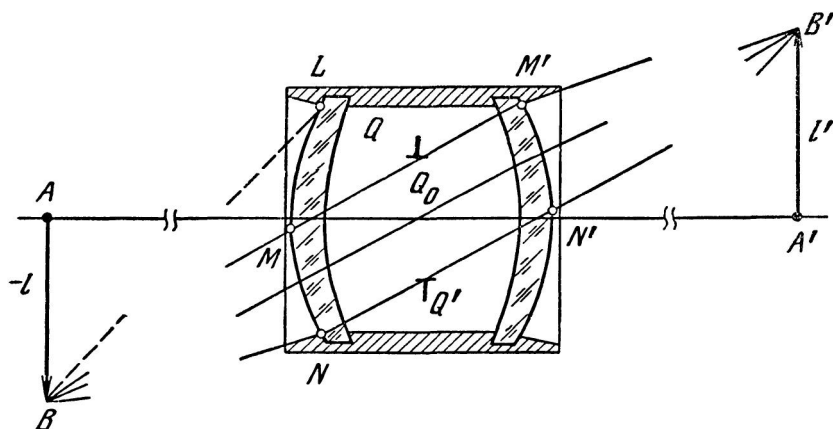


Рис 23 Ход наклонного пучка лучей через оптическую систему

Средний луч проходящего пучка лучей пересекает оптическую ось в точке  $Q_0$ . Этот луч называется главным лучом. Там, где он пересекает оптическую ось, и находится центр действующей, или апертурной диафрагмы. Таким образом,  $QQ'$  есть диаметр действующей (апертурной) диафрагмы. При уменьшении диаметра диафрагмы диаметр пучка лучей также симметрично уменьшается. Легко видеть, что только в точке  $Q_0$  можно установить такую диафрагму. Диафрагма, поставленная в любое другое место, будет вызывать несимметричное уменьшение количества лучей в пучке.

Всякая диафрагма, поставленная правее точки  $Q_0$ , вызывает срезание верхней части пучка, а диафрагма, поставленная левее точки  $Q_0$ , — срезание нижней части пучка. Пучок лучей, идущий из точки вне оптической оси, называется *наклонным пучком лучей*.

Апертурная диафрагма влияет также и на ограничение лучей осевого пучка. Допустим, что из точки  $A$  падает пучок лучей на оптическую систему (рис. 24). Этот пучок лучей проходит через края действующей диафрагмы  $QQ'$ . Существует только одно место в оптической системе, в точке  $Q_0$ , где диафрагма одновременно и симметрично влияет на оба пучка лучей: наклонный и осевой. Действительно, если сместим диафрагму  $QQ'$ , например, вправо, так, чтобы она не ограничивала осевой пучок лучей, то она будет ограничивать наклонный пучок лучей снизу, а если влево, — то сверху.

Найдем изображение апертурной диафрагмы через переднюю половину оптической системы. Из точки  $Q$  как бы выходят влево два луча, после преломления их продолжения пересекаются в  $a$ , а два луча, выходящие влево из точки  $Q'$ , преломляются так, что их продолжения пересекаются в точке  $b$ . Отсюда следует, что  $ab$  — есть изображение  $QQ'$ . Такое световое отверстие называется *входным зрачком*. Входным зрачком называется отверстие, через которое световые лучи входят в оптическую систему. Оно может быть мнимым и действительным.

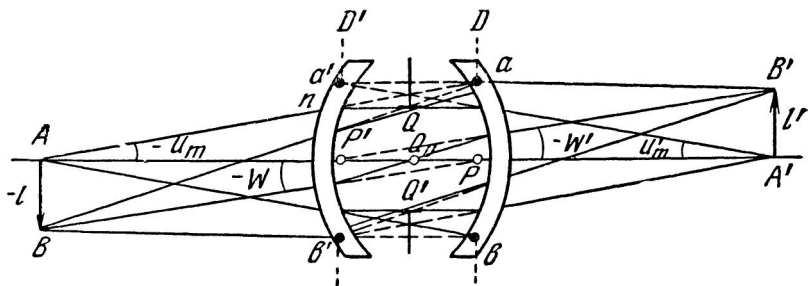


Рис. 24. Апертурная диафрагма

Аналогичным образом два луча из точек  $Q$  и  $Q'$ , идущие вправо, после преломления в задней половине оптической системы образуют изображение действующей диафрагмы  $a'b'$  через заднюю половину системы. Из этого отверстия как бы выходят световые лучи. Оно называется *выходным зрачком*. Выходным зрачком называется отверстие, из которого лучи выходят из оптической системы. Его отличие от других любых отверстий состоит в том, что из этого зрачка одновременно выходят и осевые и наклонные пучки лучей. Первая поверхность (а также и последняя) не удовлетворяет этому условию.

Входной зрачок явился изображением действующей диафрагмы через переднюю половину оптической системы. Точка  $P$  — центр входного зрачка,  $P$  — изображение точки  $Q$ , — центра действующей диафрагмы. Выходной зрачок явился изображением действующей диафрагмы через заднюю половину оптической системы. Точка  $P'$  — центр выходного зрачка,  $P'$  — изображение точки  $Q_0$  — центра диафрагмы. Следовательно, выходной зрачок  $D'$  является изображением входного зрачка  $D$  через всю оптическую систему.

Диаметр  $ab$  входного зрачка ограничивает размеры осевого пучка лучей. Если лучи идут параллельно оптической оси, то диаметр пучка равен диаметру входного зрачка. Если лучи идут из точки  $A$ , находящейся на конечном расстоянии от системы, то входной зрачок ограничивает телесный угол лучей. В главном сечении пучка, в плоскости чертежа, угол  $u_m$  называется *апертур-*

ным углом в пространстве предметов. Таким же образом угол  $u'_m$  называется *апертурным углом в пространстве изображений*. Если лучи выходят из оптической системы параллельно оптической оси, то диаметр пучка лучей равен диаметру выходного зрачка.

Наклонный пучок падает в оптическую систему под некоторым углом  $\omega$  к оптической оси. Если лучи идут из бесконечно удаленной точки, расположенной вне оптической оси, то с оптической осью все лучи образуют одинаковый угол, называемый *углом поля зрения*.

Если же лучи идут из точки  $B$  (рис. 24), находящейся на конечном расстоянии от оптической системы, то все лучи этого пучка образуют с оптической осью различные углы. Угол поля зрения  $\omega$  в этом случае определяется главным лучом, который направляется в центр входного зрачка.

В пространстве изображения аналогичным образом будем рассматривать углы *поля изображения*  $\omega'$ . Пользуясь формулами (15,1) и (15,2), найдем линейное увеличение в зрачках:

$$\beta_p = \frac{D'}{D} = \frac{\text{tg } \omega}{\text{tg } \omega'}, \quad (26,1)$$

где  $D'$  — диаметр выходного зрачка, а  $D$  — диаметр входного зрачка.

Если в плоскости изображения установить материальную диафрагму, то она будет ограничивать размеры изображения. Такая диафрагма называется *диафрагмой поля зрения*, или *полевой*. Ограничивая величину изображения, она тем самым ограничивает и размеры видимого поля зрения. На рис. 24  $A'B'$  есть радиус диафрагмы поля зрения. Диафрагма поля зрения выбирается такой величины, чтобы ограничивать круг резкого изображения, пригодного для использования.

## § 27. ВИНЬЕТИРОВАНИЕ

Для получения равномерной освещенности плоскости изображения, без учета свойств предмета, нужно выполнить два важных условия: 1) угловые величины телесных пучков лучей в каждой точке изображения должны быть одинаковыми; 2) направления осей пучков лучей в каждой точке изображения должны быть одинаковыми.

Оба эти условия практически весьма трудно выполнить. Входной зрачок в оптической системе является одним и тем же основанием световых конусов лучей от различных точек предмета. Очевидно, что телесный угол тем меньше, чем дальше от оптической оси отстоит точка предмета, или, что то же самое, чем больше поле зрения.

При одном и том же выходном зрачке, расположенном вблизи оптической системы, который является основанием выходящего светового конуса лучей, невозможно получить одинаковые направления пучков лучей в различных точках изображения.

Рассмотрим влияние оправ линз на неравномерность освещенности изображения. Оправы линз выполняют роль диафрагм. Чем больше протяженность оптической системы, тем большая возникает опасность потери света из-за диафрагмирования оправками линз. На рис. 23 показан объектив, в который проходит узкий наклонный пучок лучей. Основание этого пучка на первой поверхности оптической системы значительно меньше общего светового отверстия на этой же поверхности.

Больше всего на уменьшение светового потока влияют оправы наружных линз. Допустим, из точки  $A_1$  (рис. 25) во входной зрачок  $BB'$  падает пучок лучей. Перед зрачком находится диафрагма  $QQ'$ , которая не влияет на прохождение этих лучей. Если лучи будут попадать из точки  $A_2$ , то эта диафрагма будет задерживать часть лучей. Из точки  $A_3$  будут проходить только лучи, определяемые в главном сечении углом  $B'A_3P$ . Легко себе представить, что существуют такие точки в пространстве предметов, выше точки  $A_3$ , из которых лучи из-за диафрагмы  $QQ'$  совсем не будут попадать во входной зрачок  $BB'$ . В результате этого наблюдается явление постепенного затенения пучков лучей, поступающих в оптическую систему, вследствие срезания световых лучей оправками линз, называемое *геометрическим виньетированием*. Борьба с этим явлением путем увеличения диаметра линз не всегда возможно.

Во-первых, возникают конструктивные трудности из-за необходимости значительно увеличивать толщины линз, а во-вторых, возникают абберрационные трудности из-за необходимости исправлять абберрации широких наклонных пучков лучей.

Виньетирование является бичом многих оптических систем, а в особенности фотографических объективов, перископов и др., отличающихся значительным количеством линз. Вследствие виньетирования сечение наклонного пучка лучей всегда значительно меньше сечения осевого пучка лучей (вдвое меньше в обычных фотографических объективах и вчетверо — в сложных телескопических системах).

Блестяще разрешил проблему виньетирования проф. М. М. Русинов, применив названное им «абберационное виньетирование» в конструкциях сверхширокоугольных фотографических объективов «Руссар».

На рис. 26  $AB$  есть апертурная диафрагма. Через ее отверстие проходит осевой пучок диаметром  $ab = D$  и наклонный в том же сечении, равный  $a'b'$ , причем  $a'b' > ab$ . Следовательно, в этом случае в наклонных пучках световых лучей значительно больше, чем в обычном объективе (рис. 23). Вследствие этого удалось значительно увеличить светопропускание к краям изображения и осуществить впервые во всем мире сверхширокоугольные аэросъемочные объективы с полем зрения  $2\omega = 140^\circ$ .

Обозначим половину диаметра параллельного пучка лучей, идущих из точки на оптической оси, через  $h$ , а идущих из точки

вне оптической оси, через  $m$ . На рис. 26  $h$  и  $m$  будут соответствовать

$$\frac{ab}{2} = h \quad \text{и} \quad \frac{a'b'}{2} = m.$$

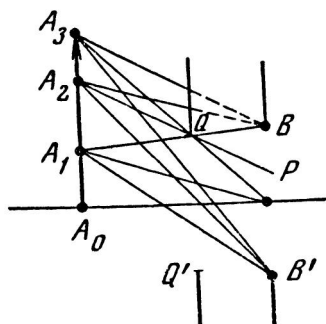


Рис. 25. Виньетирование

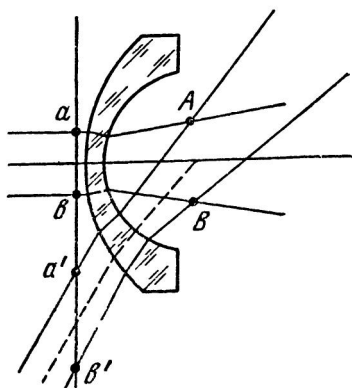


Рис. 26. Аберрационное виньетирование

Отношение этих отрезков и есть коэффициент виньетирования  $K_w$ :

$$K_w = \frac{m}{h}. \quad (27,1)$$

## § 28. СВЕТОСИЛА

*Светосилой* оптического прибора называется отношение освещенности изображения, создаваемого данной системой, к яркости изображаемого предмета. Если в частном случае принять яркость предмета постоянной величиной, то освещенность предмета  $E'$  и будет параметром, определяющим светосилу оптической системы.

Если изображение рассматривается глазом человека, то в оценке его освещенности имеется фактор субъективности. В этом случае в глазу возникает световое раздражение, психо-физиологическое восприятие которого называется *субъективной яркостью*. Если же изображение фиксируется светочувствительным фотографическим слоем или поверхностью фотоэлектрического или другого светоприемника,

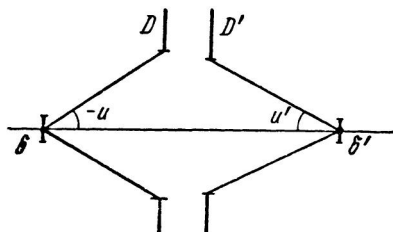


Рис. 27. К выводу формулы светосилы

изображение фиксируется светочувствительным фотографическим слоем или поверхностью фотоэлектрического или другого светоприемника,

то освещенность его оценивается объективно и может быть определена в люксах.

В оптическую систему от малого элемента площади предмета  $\delta$  (рис. 27) падает пучок света в пределах телесного угла, опирающегося на входной зрачок. Световой поток  $dF$  от малого элемента  $\delta$  равномерно светящейся поверхности с яркостью  $B$ , входящий во входной зрачок оптического прибора, определяется, как известно, выражением

$$dF = \delta \pi B \sin^2 u,$$

где  $u$  — апертурный угол в пространстве предметов. Аналогично можно написать

$$dF' = \delta' \pi B' \sin^2 u',$$

где  $u'$  — апертурный угол в пространстве изображений.

Известно, что если предмет с яркостью  $B$  расположен в оптической среде с показателем преломления  $n$ , а изображение с яркостью пучка  $B'$  в среде с показателем преломления  $n'$ , то яркость пучка зависит от соотношения показателей преломления и от коэффициента пропускания света  $\tau$  и определяется выражением

$$B' = \tau \left( \frac{n'}{n} \right)^2 B. \quad (28,1)$$

Освещенность изображения находится как отношение светового потока  $dF'$ , прошедшего через систему, к площади изображения  $\delta'$ :

$$E' = \left( \frac{n'}{n_1} \right)^2 \pi B \tau \sin^2 u'. \quad (28,2)$$

Это основная формула для определения освещенности изображения.

Если предмет расположен в бесконечности, а оптическая система в однородной среде, например в воздухе, то  $n_1 = n'$ , а угол  $u'$  может быть заменен отношением половины диаметра зрачка входа к фокусному расстоянию, тогда

$$E' = \frac{\pi B \tau}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2. \quad (28,3)$$

Отношение диаметра входного зрачка  $D$  к фокусному расстоянию  $f'$  называется *относительным отверстием*. Квадрат относительного отверстия называется *геометрической светосилой*, а произведение коэффициента пропускания света  $\tau$  на геометрическую светосилу называется *физической светосилой*.

Величина, обратная относительному отверстию, называется *знаменателем значения геометрического относительного отверстия* (диафрагменное число):

$$n = \frac{f'}{D}. \quad (28,4)$$

Относительное отверстие принято обозначать следующим образом: 1:4,5; 1:6,3 и т. д. Соответствующими знаменателями значения геометрического относительного отверстия являются:  $n = 4,5$ ;  $n = 6,3$  и т. д.

**Пример 15.** Определить освещенность изображения Луны в фокальной плоскости фотографического объектива с фокусным расстоянием 50 мм и отверстием 10 мм, если  $\tau = 0,65$ .

**Решение.** Яркость Луны 2500 нт,  $D = 0,01$  м,  $f' = 0,05$  м,  $\pi = 3,14$  и  $\tau = 0,65$ .

Применив формулу (28,3), получим

$$E' = 51 \text{ лк.}$$

## § 29. ОСВЕЩЕННОСТЬ ПО ПОЛЮ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Найдем освещенность по полю изображения, если известна освещенность в центре поля. Оптическая система представлена в виде выходного зрачка диаметром  $D'$ . Яркость предмета постоянна. Расстояние от выходного зрачка до плоскости изображения также остается без изменения. Требуется определить зависимость в освещенности точек изображения, удаленных от оптической оси на различные расстояния.

Световой поток  $F'_0$  распространяется внутри телесного угла  $\omega_0$  и освещает бесконечно малый элемент площади изображения  $\delta_0'$  на оптической оси системы (рис. 28). Аналогичным образом световой поток  $F'_w$  распространяется внутри телесного угла  $\omega_w$  и освещает элемент площади изображения  $\delta_w'$  в точке  $K'$ , удаленной от оптической оси.

Эти элементы отстоят от выходного зрачка на различных расстояниях, и освещенность их, как известно из физики, обратно пропорциональна квадратам расстояний, но сами расстояния пропорциональны косинусу угла наклона главного луча  $w'$ , а площадь выходного зрачка, так же как и элемент изображения, наклонена к главному лучу под тем же углом  $w'$ .

Следовательно, освещенность элемента изображения в точке, удаленной от оптической оси, пропорциональна косинусу четвертой степени угла поля изображения по отношению к освещенности в центре поля изображения:

$$E'_w = E'_0 \cos^4 w'. \quad (29,1)$$

Эта общеизвестная формула справедлива в случае малого диаметра выходного зрачка и при отсутствии виньетирования. Обычно выходные зрачки достаточно велики, поэтому формула косинусов четвертой степени является формулой приближенной.

Учет коэффициента виньетирования  $K_w$  для данного наклона пучка лучей приводит к формуле:

$$E'_w = E'_0 K_w \cos^4 w'. \quad (29,2)$$



Величина  $K_w$  может быть и больше единицы, являясь переменной в пределах рассматриваемого поля изображения. Если этому коэффициенту дать значение обратной величины косинуса угла поля изображения, то тогда освещенность изображения будет пропорциональна косинусу третьей степени. Для такого частного случая справедлива формула

$$E'_w = E'_0 \cos^3 w'. \quad (29,3)$$

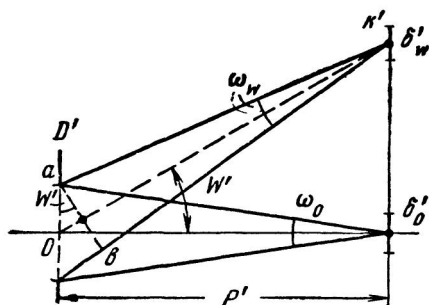


Рис. 28. Освещенность по полю изображения

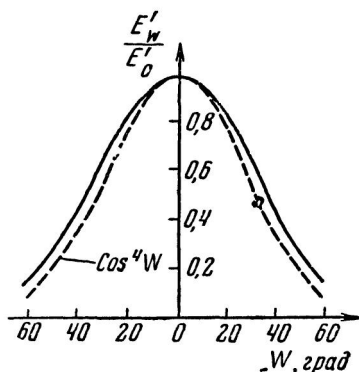


Рис. 29. Характеристическая кривая падения освещенности изображения объектива «Руссар-25», 1 : 6,3;  $2w=110^\circ$

Подобного рода светопропускание пучков лучей было осуществлено по идее М. М. Русинова в сверхширокоугольных объективах «Руссар».

Падение освещенности принято характеризовать графиком. Для его построения откладывают по оси ординат отношения освещенности точек изображения, удаленных от центра, к освещенности в центре, а по оси абсцисс — углы поля зрения (рис. 29).

### § 30. ПОЛЕ ЗРЕНИЯ

*Поле зрения* называется та часть пространства предметов, которая видна или изображается с помощью данной оптической системы.

Поле зрения оптических систем принято характеризовать в угловой мере, если наблюдаются значительно удаленные предметы, и в линейной мере, если наблюдаются близко расположенные предметы.

Поле зрения телескопических систем и фотографических объективов характеризуется в угловой мере. Например, поле зрения полевого бинокля  $2w=12^\circ$ , а поле зрения фотообъектива «Ю-8»,  $2w=45^\circ$ . Поле же зрения репродукционных и проекционных объ-

ективов определяется и в угловой мере (например,  $2\omega=45^\circ$ ), и в линейной (например,  $70\times 80$  см). Поле зрения микроскопов определяется в линейной мере (например,  $2l=0,5$  мм).

Поле зрения ограничивается *диафрагмой поля зрения*, или *левой диафрагмой*. Диафрагма обычно имеет форму круга в наблюдательных приборах, работающих совместно с глазом человека, и форму прямоугольника в фотографирующих.

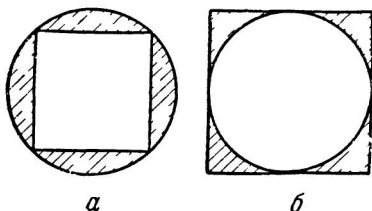


Рис 30 Круг полезного изображения

Размер диафрагмы определяется:

1. Величиной резкого изображения, заметно неухудшенного аберрациями, пригодного для практических целей.
2. Величиной изображения с достаточной освещенностью, уменьшенной виньетированием и действием закона четвертой степени косинуса угла поля изображения.

Созданное таким образом поле изображения называется полезным. Вне установленного поля зрения оптическая система образует изображение, практически непригодное для использования.

Центрированная оптическая система круговой симметрии дает изображение в виде круга. Существует два метода использования полезного круга изображения. Тот или иной формат или вписывается в круг (рис. 30, а), или описывается около круга (рис. 30, б). В последнем случае полезный круг изображения используется полностью и изображение имеет форму квадрата. Вне этого круга, на уголках квадрата изображения, качество изображения значительно понижено как по резкости, так и по световой интенсивности. Такой принцип использования полезного изображения в настоящее время используется в некоторых аэрофотоаппаратах.

## § 31. ГЛУБИНА ИЗОБРАЖАЕМОГО ПРОСТРАНСТВА

*Глубиной* изображаемого пространства называется измеренное вдоль оптической оси расстояние между точками пространства предметов, определяющим границы его резкого изображения оптической системой в данной плоскости. Различают глубину в пространстве предметов (глубина изображаемого пространства) и глубину в пространстве изображений (глубина резкости). В основе их лежат одинаковые представления, а именно: способность глаза человека видеть изображения, образованные кружками рассеяния, в виде резких точечных изображений.

Рассмотрим оптическую систему, изображенную в виде лучков входа и выхода (рис. 31).

Допустим, что плоскость  $M'$  оптически сопряжена с плоскостью  $M$ . Точки  $P_1$  и  $P_2$  проектируются на плоскость изображения

$M'$  в виде кружков рассеяния  $\delta'$ . Если глаз человека, имеющий определенную разрешающую способность, не сможет увидеть кружки рассеяния из-за их малости, то вместе с предметами, расположенными в плоскости  $M$ , он будет видеть резко точки  $P_1$  и  $P_2$ . Глубина в пространстве предметов определяется формулой

$$T = T_1 + T_2, \quad (31,1)$$

где  $T_1$  — передняя глубина,  $T_2$  — задняя глубина.

Плоскость  $M$  называется *плоскостью наводки*.

Из подобия треугольников  $CEP_1$  и  $P_1BA$  имеем

$$\frac{\delta}{D} = -\frac{T_1}{p_1}.$$

Заменяя  $p_1 = p + T_1$  и преобразуя, получим

$$T_1 = -\frac{\delta p}{D + \delta}. \quad (31,2)$$

Аналогичным образом найдем заднюю глубину

$$T_2 = -\frac{\delta p}{D - \delta}. \quad (31,3)$$

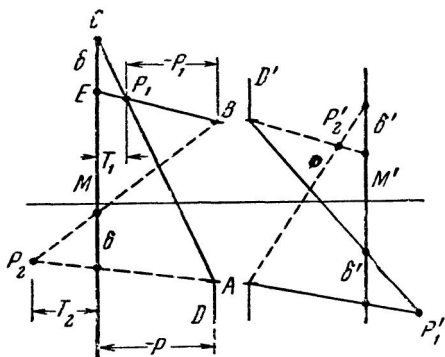


Рис 31. Глубина в пространстве предметов

Кружки рассеяния  $\delta'$  видны, если их угловые размеры превосходят разрешающую силу глаза. Кружку рассеяния  $\delta'$  соответствует в плоскости предметов  $M$  кружок рассеяния  $\delta$ . Между  $\delta$  и  $\delta'$  для случая бесконечно удаленных предметов существует простая зависимость:

$$\frac{\delta'}{\delta} = -\frac{f'}{f}.$$

Если разрешающую силу в угловой мере обозначим через  $\psi$ , то  $\delta' = f' \operatorname{tg} \psi$  и последнее выражение примет вид

$$\delta = -p \operatorname{tg} \psi.$$

Подставляя это равенство в формулу (31,2) и (31,3), получим

$$T_1 = \frac{p^2 \operatorname{tg} \psi}{D - p \operatorname{tg} \psi} \quad (31,4)$$

и

$$T_2 = \frac{p^2 \operatorname{tg} \psi}{D + p \operatorname{tg} \psi}. \quad (31,5)$$

Подставляя в (31,1), получим

$$T = \frac{2Dp^2 \operatorname{tg} \psi}{D^2 - p^2 \operatorname{tg}^2 \psi}. \quad (31,6)$$

Найдем такое положение плоскости наводки, начиная с которого и далее от оптической системы все предметы изображаются резко, т. е.  $T_2 = \infty$ .

Для этого необходимо, чтобы

$$D + p \operatorname{tg} \psi = 0,$$

или

$$p = -\frac{D}{\operatorname{tg} \psi}. \quad (31,7)$$

Определим переднюю глубину  $T_1$  для такого положения плоскости предметов.

В формулу (31,4) вместо  $p$  подставим  $-D/\operatorname{tg} \psi$ :

$$T_1 = \frac{\frac{D^2}{\operatorname{tg}^2 \psi} \operatorname{tg} \psi}{D + \frac{D \operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg} \psi}} = \frac{D}{2 \operatorname{tg} \psi},$$

или

$$T_1 = -\frac{p}{2}. \quad (31,8)$$

Найденное расстояние до плоскости наводки  $p = -D/\operatorname{tg} \psi$ , при котором задняя глубина  $T_2 = \infty$  называется *гиперфокальным фокусным расстоянием*. В этом случае все предметы, расположенные от объектива на расстоянии от  $p_1 = -D/2 \operatorname{tg} \psi$  до бесконечности, изображаются в плоскости изображения резко. Расстояние  $p_1$  и следует именовать «началом бесконечности».

Преобразуем формулы (31,2) и (31,3), заменив в них величины  $\delta$  и  $D$  следующими выражениями:

$$\delta = -\frac{p\delta'}{p'} \quad \text{и} \quad D = \frac{f'}{n}.$$

Тогда

$$T_1 = \frac{p^2 \delta' n}{f'^2 - \delta' p n} \quad (31,9)$$

и

$$T_2 = \frac{p^2 \delta' n}{f'^2 + \delta' p n}. \quad (31,10)$$

Мы получили рабочие формулы для расчета глубины изображаемого пространства.

**Пример 16.** Найти глубину изображаемого пространства для фотографического объектива с фокусным расстоянием 50 мм и относительным отверстием 1:3,5 при наводке на плоскость, расположенную от объектива на расстоянии 5 м, если разрешающая способность объектива 25 *штр/мм*.



Из треугольника  $KA_2B_2$ :  $\delta' = k' \operatorname{tg} \psi_r$ . Угол  $\psi_r$  есть предельный угол разрешающей способности глаза, а  $k'$  — расстояние, с которого наблюдается изображение. Подставив последнее выражение в предыдущее и преобразовав, получим

$$T'_1 = \frac{\rho' k' \operatorname{tg} \psi_r}{D'} \quad (32,2)$$

Отсюда получим уравнение глубины в пространстве изображений в общем виде:

$$T' = \frac{2\rho' k' \operatorname{tg} \psi_r}{D'} \quad (32,3)$$

В пределах  $T'$  можно смещать плоскость изображения, а изображения предметов, расположенных в одной плоскости, будут оставаться для глаза резкими.

Если рассматриваются изображения бесконечно удаленных предметов, то  $\rho' = f'$ , в то же время  $k'$  есть расстояние наилучшего зрения, равное 250 мм.

Тогда

$$T' = \frac{500f' \operatorname{tg} \psi_r}{D} \quad (32,4)$$

Если изображение фотографируется, то  $\delta'$  определяется из предела разрешающей способности в линиях на миллиметр. Тогда из соотношения (32,1) имеем при  $\rho' = f'$

$$T'_1 = \frac{\delta' f'}{D} \quad (32,5)$$

Для высококачественного объектива допустимо  $\delta' = 0,01$  мм, тогда

$$T' = 0,02n \quad (32,6)$$

Глубина резкости оптической системы представляет наибольший интерес для фотографических приборов. В практике чаще всего применяются относительные отверстия 1:2—1:4, и в этих случаях глубина резкости составляет 0,05—0,1 мм.

## Глава V

### КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

#### § 33. РОЛЬ АБЕРРАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ ИЗОБРАЖЕНИИ

Для определения точки изображения в идеальной оптической системе достаточно найти в пространстве изображений точку пересечения двух лучей. Такая система образует резкое изображение, и каждой точке предмета соответствует только одна точка изображения. В действительности, в реальных оптических системах изображение образуется в виде кружков или пятен рассеяния.

Широкие пучки лучей, вышедшие из одной точки предмета, преломляясь оптической системой, не образуют одну точку схода. Ошибка, или погрешность изображения в оптической системе, вызываемая отклонением луча от того направления, по которому он должен был бы идти в идеальной оптической системе, называется *абберацией*.

Изучая изображение точки, образованное различными лучами, можно заметить характерные aberrации, присущие только этим лучам. Поэтому отдельно рассматривают прохождение различных лучей через оптическую систему и каждой aberrации присваивают свое наименование.

В области нулевых лучей образуется безабберационное изображение. Такое изображение позволяет найти положение плоскости изображения  $M'$  (рис. 33), оптически сопряженное с плоскостью предметов  $M$ .

Из точки  $A$ , расположенной на оптической оси, выходит осевой пучок лучей. Эти лучи в плоскости  $M'$  образуют геометрически правильный кружок рассеяния. Здесь достаточно рассмотреть преломление лучей в одной меридиональной плоскости, так как во всех меридиональных плоскостях существуют одинаковые условия для преломления лучей.

Из точки  $B$ , удаленной от оптической оси, выходит наклонный пучок лучей, образующий изображение в виде пятна рассеяния

$B'$ . Чаще всего ограничиваются рассмотрением хода лучей в меридиональной и сагиттальной плоскостях. В первом случае имеем дело с *меридиональным* наклонным пучком лучей, рассматриваемым в плоскости чертежа, а во втором — с *сагиттальным*, ему перпендикулярным, содержащим главный луч меридионального пучка лучей. Меридиональные лучи в отверстии системы опираются на отрезок  $ab$ , а сагиттальные на  $cd$ .

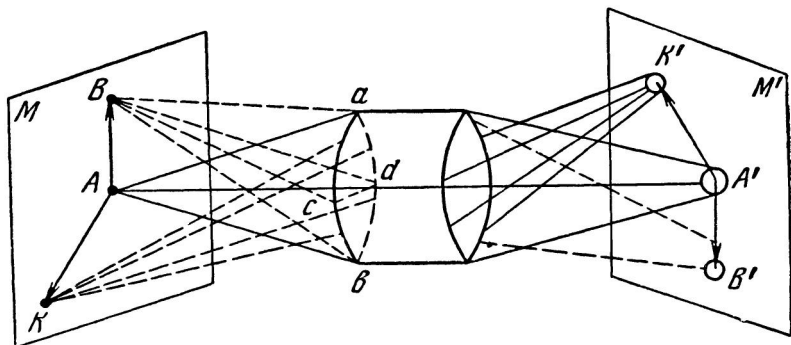


Рис. 33. Образование изображений широкими пучками лучей

Более точное знание структуры точек изображения дают *внемеридиональные*, или *косые* лучи, составляющие большую часть широкого пучка лучей. Широкий пучок лучей опирается на все отверстия и содержит меридиональные и сагиттальные лучи. Косые лучи не лежат в меридиональной плоскости. Такие лучи показаны выходящими из точки  $K$ . Любой пучок лучей, выходящих из точки вне оптической оси, например из точек  $B$  и  $K$ , имеет косые лучи.

Вычисление координат точек изображения, образованных выбранными для анализа лучами, дает возможность рассмотреть структуру точки изображения и найти размеры кружков и пятен рассеяния. Однако геометрические размеры этих кружков еще не указывают на достаточность приближения изображения реальной оптической системы к идеальной. Обычно их размеры достаточно велики, и для определения истинной картины изображения необходимо знать распределение световой энергии в кружках и пятнах рассеяния. Действительно, если преобладающая часть световой энергии соберется в одну точку, то именно эта точка будет определять изображение. В другой части пятна рассеяния образуется изображение с несравненно меньшей световой интенсивностью.

До недавнего времени к вычислению распределения световой энергии в «точке» изображения прибегали в исключительных случаях. В практике вычисления оптических систем ограничивались рассмотрением аберраций осевых и наклонных меридиональных



и сагиттальных лучей, и в особых случаях в сложных объективах — косых лучей. В настоящее время применение быстродействующих электронных вычислительных машин позволило выполнять сложные вычисления в кратчайшее время и сделало возможным не только быстро вычислять распределение световой энергии в кружке (пятне) рассеяния, но и контраст изображения.

При создании всякого рода наблюдательных приборов, работающих совместно с глазом, обычно ограничиваются рассмотрением аберраций осевого и наклонного пучков лучей, лежащих в меридиональной плоскости. Кроме того, рассматривают меридиональные и сагиттальные лучи, бесконечно близкие к главному лучу, иногда называемые элементарным астигматическим пучком. Сложные же объективы (фотографические, микрообъективы и др.) требуют при этом еще знания аберраций лучей, лежащих в сагиттальной плоскости.

Большое значение для оценки аберраций имеет сравнительный анализ с аберрациями известных систем. Сопоставление аберраций какой-либо новой оптической системы с аберрациями известной системы, близкой по назначению и устройству, позволяет с большей степенью вероятности установить допустимость той или иной аберрационной картины.

Условия наблюдения изображения являются решающими в вопросе о допустимости тех или иных аберраций. Существуют четыре главных вида наблюдения изображения:

1. Глаз человека рассматривает изображение через оптическую систему. Оптические системы, предназначенные для этой цели, называются *визуальными*. К ним, например, относятся зрительные трубы, микроскопы, спектроскопы и другие.

2. Глаз человека рассматривает изображение на экране. Оптические системы, образующие такие изображения, называются *проекторными*. К их числу относятся эпидиаскопы, проекторы, трансформаторы и др.

3. Изображение фиксируется каким-нибудь светочувствительным слоем. Глаз человека рассматривает изображение, зафиксированное этим слоем, без оптической системы, его образовавшей. Оптические системы для образования таких изображений называются *фотографическими*. К их числу относятся: киносъёмочные объективы, фотографические объективы, спектрографы и др. К этому же виду наблюдения изображений относят телевизионные объективы и объективы электронно-оптических преобразователей (ЭОП).

4. Изображение образуется на фотокатодe светоприемника (фотоэлемент, ФЭУ, термоэлемент и т. п.) и интегрально отображает яркость предмета. В этом случае изображение не имеет структуры, подобной предмету, а представляет собой площадку, равномерно освещенную в единицу времени. Изображение такого вида называется *интегральным*, а оптические системы, образующие такие изображения, называются *фотоэлектрическими*.

Глаз человека выполняет важную роль в наблюдении изображения — с его помощью человек оценивает качество изображения. Если недостатки оптической системы в изображении не могут быть обнаружены глазом, то такие изображения представляются человеку совершенными. Следовательно, знание разрешающей способности глаза для тех или иных случаев наблюдения позволяет более точно определять оптимальные размеры кружков (пятен) рассеяния. Например, если для визуальных приборов за предел разрешения глаза в угловой мере принимают 30—60 сек., то для проекционных систем в условиях кинотеатра — 2—3 мин..

*Качество изображения* оптических систем — это общий термин, включающий в себя два понятия:

1. Способность оптической системы отдельно передавать разные изображения. Это свойство называется *разрешающей способностью*.

2. Способность оптической системы правильно изображать контраст предмета.

Представим себе, что фотографируется предмет в виде чередующихся белых и черных полос. Оптическая система позволяет получить изображение этих отличающихся друг от друга по контрасту полос, малых по ширине. Но изображение имеет между полосами весьма малый контраст, и сами полосы не выглядят резкими, хотя и различны. Такая оптическая система имеет высокую разрешающую способность, но плохое качество изображения, так как не выполнено второе условие.

Качество изображения оптической системы определяется ее aberrациями. При рассмотрении aberrаций различают: 1) сферическую aberrацию, 2) отступление от условия синусов, 3) сферическую aberrацию наклонного пучка лучей, 4) меридиональную кому, 5) сагиттальную кому, 6) aberrации косых лучей, 7) астигматизм, 8) кривизну поля, 9) дисторсию, 10) сферическую aberrацию в зрачках, 11) хроматизм положения, 12) хроматизм увеличения, 13) хроматическую разность сферических aberrаций, 14) хроматическую aberrацию наклонного пучка лучей.

Сферическая aberrация и отступление от условия синусов определяются при рассмотрении в меридиональной плоскости хода лучей, выходящих из точки предмета, расположенной на оптической оси.

Сферическая aberrация наклонного пучка лучей, меридиональная кома, дисторсия и сферическая aberrация в зрачках определяются при рассмотрении в меридиональной плоскости хода лучей, выходящих из точки предмета, расположенной вне оптической оси.

Сагиттальная кома наклонного пучка лучей определяется при рассмотрении в сагиттальной плоскости хода лучей, выходящих из точки предмета, расположенной вне оптической оси.

Aberrации косых лучей определяются из рассмотрения хода пучка лучей, выходящего из точки предмета, расположенной вне

оптической оси, и опирающегося на все отверстия входного зрачка.

Астигматизм и кривизна поля изображения определяются при рассмотрении элементарного астигматического пучка, бесконечно близкого к главному лучу, выходящему из точки предмета вне оптической оси.

Хроматизм положения определяется из рассмотрения хода параксиальных лучей с различной длиной волны, выходящей из точки предмета, расположенной на оптической оси. Хроматическая разность сферических aberrаций определяется из рассмотрения в меридиональной плоскости хода лучей различной длины волны, выходящих из точки предмета, расположенной на оптической оси. Хроматизм увеличения и хроматическая aberrация наклонного пучка лучей определяются из рассмотрения в меридиональной плоскости хода лучей различной длины волны, выходящих из точки предмета вне оптической оси.

### § 34. СФЕРИЧЕСКАЯ АБЕРРАЦИЯ

Под сферической aberrацией принято понимать aberrацию оптической системы, которая рассматривается для пучка лучей, выходящего из точки предмета, расположенной на оптической оси.

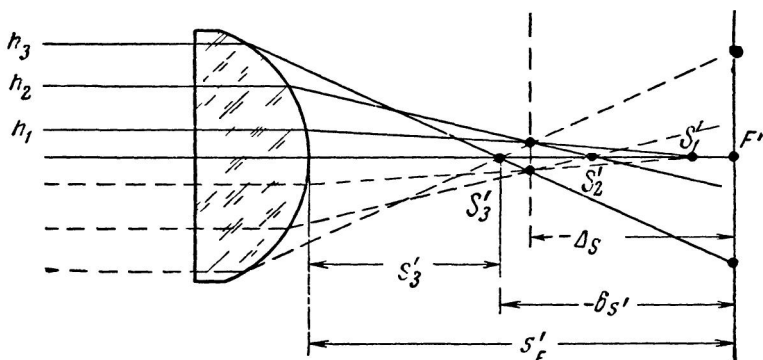


Рис. 34. Сферическая aberrация

Сферическая aberrация имеет место и для других пучков лучей, выходящих из точек предмета, удаленных от оптической оси, но в таких случаях она рассматривается как составная часть aberrаций всего наклонного пучка лучей.

Допустим, что предмет находится в бесконечности, и в оптическую систему поступает параллельный пучок лучей. Рассмотрим лучи, падающие на поверхность линзы, на высотах  $h_1$ ,  $h_2$  и  $h_3$  от оптической оси (рис. 34).

Первую плоскую поверхность линзы лучи проходят без преломления. Вторую поверхность они встречают под весьма значи-

тельными углами падения. Вследствие этого наиболее удаленные от оптической оси лучи преломляются всего сильнее и образуют точку схода, наиболее удаленную от фокальной плоскости.

В результате этого явления цилиндрический пучок лучей в пространстве предметов, после преломления линзой, в пространстве изображений получает вид не конуса, а некоторой воронкообразной фигуры, наружная поверхность которой вблизи узкого места называется каустической поверхностью. Световая энергия распределяется на значительную по величине каустическую поверхность а тем самым нарушается образование точечного изображения.

Расстояние по оптической оси между точками схода нулевых и крайних лучей называется *продольной* сферической аберрацией

$$\delta s' = s'_k - s'_F \quad (34,1)$$

Если предмет расположен вблизи оптической системы, то вместо величины заднего вершинного фокусного расстояния берут расстояние от вершины последней поверхности системы до изображения  $s'_0$ , и формула (34,1) приобретает вид

$$\delta s' = s'_k - s'_0 \quad (34,2)$$

В плоскости изображения получаем кружок рассеяния, диаметр которого  $\delta'$  с достаточной точностью находим из выражения

$$\delta' = \frac{2h_1 \delta s'}{a'} \quad (34,3)$$

где  $2h_1$  — диаметр отверстия системы;  $a'$  — расстояние от системы до точки изображения;  $\delta s'$  — продольная аберрация. Если предмет расположен в бесконечности, то  $a' = f'$ .

Сферическая аберрация объектива может быть выражена и в угловой мере:

$$\operatorname{tg} u' = \frac{h_1 \delta s'}{f'^2} \quad (34,4)$$

Наименьший диаметр кружка рассеяния образуется на расстоянии  $\Delta_s$  от плоскости изображения. Плоскость, соответствующую наименьшим кружкам рассеяния, называют *плоскостью наилучшей установки*. Однако не всегда в этой плоскости получается наилучшая резкость изображения, так как основным является распределение световой энергии в кружке рассеяния. Однако для некоторых оптических систем, например для осветительных (конденсоры), плоскость наилучшей установки, найденная по положению наименьшего диаметра кружка рассеяния, практически является наилучшей плоскостью изображения.

Сферическая аберрация положительной линзы отрицательна, а отрицательной линзы — положительна. Комбинируя положи-

тельные и отрицательные линзы, можно сконструировать объектив, отличающийся несравненно меньшей сферической aberrацией.

Все aberrации, в том числе и сферическую, обычно представляют в виде характеристических кривых.

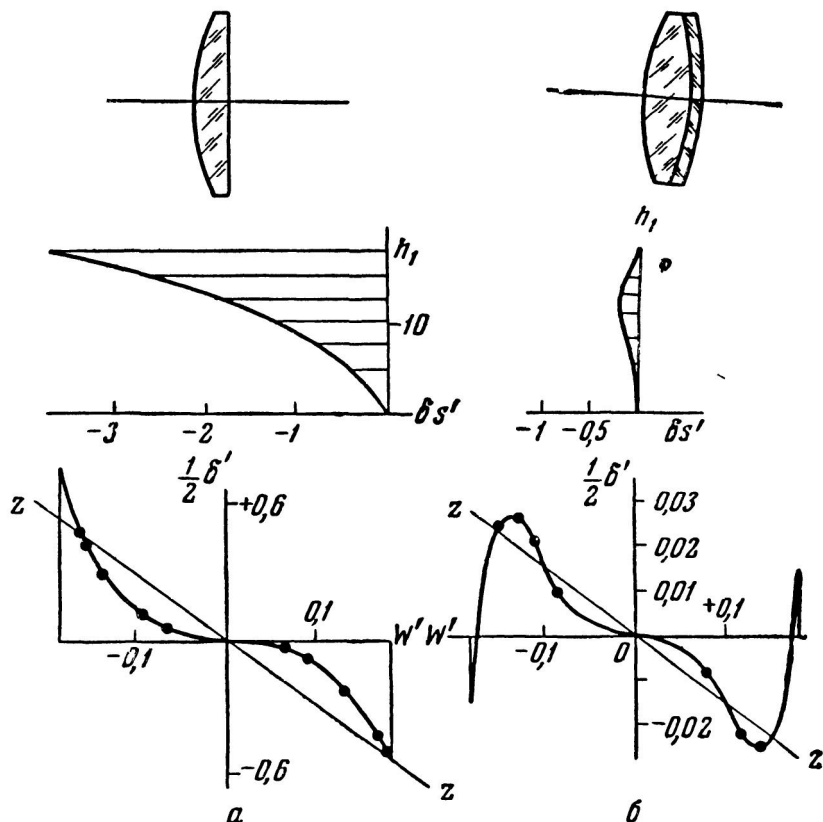


Рис. 35. Характеристические кривые сферической aberrации: сверху — продольные aberrации, внизу — поперечные aberrации: *a* —  $f'=100$ ;  $1:2,7$ ;  $r_1=52$ ;  $r_2=\infty$ ;  $d=6,6$ ;  $n=1,52$ ; *б* —  $f'=100$ ;  $1:2,7$ ;  $r_1=62,61$ ;  $r_2=-44,612$ ;  $r_3=-126,34$ ;  $d_1=11$ ;  $d_2=2$ ; К8; ТФ2

Для построения характеристической кривой продольной сферической aberrации по оси абсцисс откладывают продольную сферическую aberrацию  $\delta s'$ , а по оси ординат — высоты лучей на входном зрачке  $h$ . Для построения аналогичной кривой поперечной aberrации по оси абсцисс откладывают тангенсы апертурных углов в пространстве изображений, а по оси ординат — радиусы кружков рассеяния.

На рис. 35 показаны характеристические кривые продольной

и поперечной сферических aberrаций одиночной линзы и двухлинзового склеенного объектива. Продольные aberrации показаны в одинаковом масштабе. В сложной системе aberrации значительно уменьшены. Такая система называется коррегированной на сферическую aberrацию. Поперечные aberrации по оси ординат показаны в разных масштабах, в отношении 1:30. В данном примере поперечные aberrации одиночной линзы примерно в 30 раз больше, чем у объектива, при равных фокусных расстояниях и относительных отверстиях.

Для положительной одиночной линзы характерным является отрицательное значение продольной сферической aberrации. Такая aberrация называется недокоррегированной. Если же вся характеристическая кривая сферической aberrации или ее большая часть находилась бы справа от оси ординат, aberrация была бы положительной и называлась бы перекооррегированной.

На графиках поперечных aberrаций через центр координат проведем вспомогательные прямые таким образом, чтобы кривая aberrации вверх и вниз от нее имела одинаковые отступления. На графике одиночной линзы это выдержано почти полностью, а для двухлинзового объектива имеем отступления от этого условия для обоих краев кривой, соответствующих aberrациям лучей, идущих в самой краевой зоне отверстия. Неточность проведения вспомогательной прямой оправдывается незначительным влиянием небольшого участка площади зрачка по сравнению со всем отверстием. Эти вспомогательные прямые позволяют определить положение плоскости наилучшей установки.

Тангенсы угла наклона этой прямой указывают на величину смещения плоскости наилучшей установки. Изображая поперечные aberrации так, как показано на рис. 35,  $\Delta_s$  можно вычислить по следующей формуле\*:

$$\Delta_s \cong \frac{\delta'}{w'} \quad (34,5)$$

Так, например, для случая одиночной линзы имеем

$$\Delta_s \cong 3,0 \text{ мм},$$

а для объектива

$$\Delta_s \cong 0,15 \text{ мм}.$$

Вспомогательная прямая является как бы новой ординатой для кривой, относительно которой можно определять поперечные aberrации в плоскости наилучшей установки. Так, например, для одиночной линзы имеем поперечные aberrации (кружок) в 0,3 мм, а для объектива 0,01 мм.

Если сферическая aberrация уничтожена (коррегирована) для

\* См. Д. С. Волосов. Методы расчета сложных фотографических систем. Л.— М, Гостехиздат, 1948, стр. 186.

края входного зрачка, то величина  $\Delta_s$  может быть определена по формуле

$$\Delta_s \cong 0,8\delta s'_{\text{зоны}}. \quad (34,6)$$

Зоной входного зрачка называют ординату на зрачке, равную  $0,35D$ . Для этой высоты луча сферическая абберация обычно приобретает наибольшее значение, тогда как для края отверстия она равна нулю.

**Пример 17.** Продольная сферическая абберация объектива  $f'=200$  мм для пучка лучей диаметром 40 мм составляет 0,16 мм. Определить диаметр кружка рассеяния и сферическую абберацию в угловой мере.

**Решение.** Дано  $f'=200$  мм;  $h_1=20$  мм и  $\delta s'=0,16$  мм. Применив формулы (34,3) и (34,4), получим

$$\delta' = 0,032 \text{ мм}, \quad \text{tg } u' = 0,00008 \text{ и } u' = 2,7''.$$

### § 35. ОТСТУПЛЕНИЕ ОТ ЗАКОНА СИНУСОВ

Немецким физиком Аббе в прошлом веке было сформулировано условие образования совершенного изображения бесконечно малого элемента площади предмета широкими пучками лучей. Это условие, известное под названием *апланатизма*, требует, чтобы, во-первых, была уничтожена сферическая абберация для центра предмета и, во-вторых, был выполнен для всего отверстия закон синусов. При невыполнении условия апланатизма точки изображения, лежащие вне оптической оси, не будут иметь совершенного изображения в сопряженной плоскости.

Закон синусов имеет вид

$$n l \sin u = n' l' \sin u', \quad (35,1)$$

или через линейное увеличение

$$\beta = \frac{n \sin n}{n' \sin u'}. \quad (35,2)$$

Обозначая через  $\beta$  линейное увеличение для нулевого луча, а через  $\beta_k$  увеличение, вычисляемое для конкретного луча, выходящего из точки на оси оптической системы, получим отступление от закона синусов:

$$\delta\beta = \beta_k - \beta. \quad (35,3)$$

Если же предмет расположен в бесконечности, то отступление от закона синусов принимает следующий вид:

$$\delta f' = \frac{h_k}{\sin u'_k} - f'. \quad (35,4)$$

Здесь  $h_k$  — высота луча на зрачке входа, а  $u'_k$  — апертурный

угол в пространстве изображений, соответствующий данному лучу.

Штебле и Лигоцкий выдвигали условие подобия каустических поверхностей всех косых пучков лучей, если сферические аберрации не уничтожены. Такое условие получило наименование *изопланатизма*, а его выражения явились обобщением закона синусов.

В ряде случаев выполнение условий апланатизма и изопланатизма позволило получить достаточно хорошие практические результаты, в частности улучшить качества изображения объективов микроскопов. Однако выполнение этих условий для широкоугольных и светосильных оптических систем не означает достижения совершенных изображений.

Опыт показал, что при вычислении оптических систем отступление от закона синусов является удобным математическим параметром, выражающим некоторую закономерность в исправлении аберраций наклонных пучков лучей и, в частности, сферической аберрации наклонного пучка лучей и меридиональной комы.

Точки, в которых отсутствует сферическая аберрация и соблюден закон синусов, называются *апланатическими*. А точки, образуемые подобными каустическими поверхностями пучков лучей, — *изопланатическими*.

В фотографической оптике объективы, в которых соблюдено условие апланатизма, называются *апланатами*. Эти объективы в настоящее время имеют весьма малое распространение из-за небольшого поля зрения и малой светосилы.

### § 36. КОМА

В наклонном пучке лучей, кроме сферической аберрации, обнаруживается и нарушение симметрии всего строения, которое называют *комой*. Из точек *B* и *K* (рис. 33) выходят пучки лучей, опирающиеся на входной зрачок оптической системы. Лучи этих пучков образуют в плоскости изображения в двух взаимно перпендикулярных направлениях, меридиональном и сагиттальном, несимметричное пятно рассеяния. Кому в меридиональном сечении называют *меридиональной*, в сагиттальном сечении — *сагиттальной*.

Основной причиной комы является, как и в случае сферической аберрации, кривизна поверхности. Но в осевом пучке, вверх и вниз от оптической оси, существует полная симметрия в условиях преломления, а для наклонного пучка лучей этой симметрии нет. Поэтому верхние и нижние части пучка после преломления получают различные погрешности. Например, нижние лучи преломляются сильнее (рис. 36,а), а верхние слабее. Здесь показана меридиональная кома, характерная для одиночной положительной линзы.

Несимметричность пятна рассеяния в меридиональной плоскости определяется формулой



$$k = \frac{l'_{+m} + l'_{-m}}{2} - l'_{гл.}$$

(36,1)

Меридиональная кома отсутствует в том случае, если выражение (36,1) равно нулю. Но этого условия недостаточно для образования совершенного изображения. На рис. 36,б в плоскости изображения  $F'$  видно большое пятно рассеяния, обусловленное сферической aberrацией. Возможен и такой случай, когда все меридиональные лучи пересекаются вблизи точки  $B'$  (рис. 36,в) та-

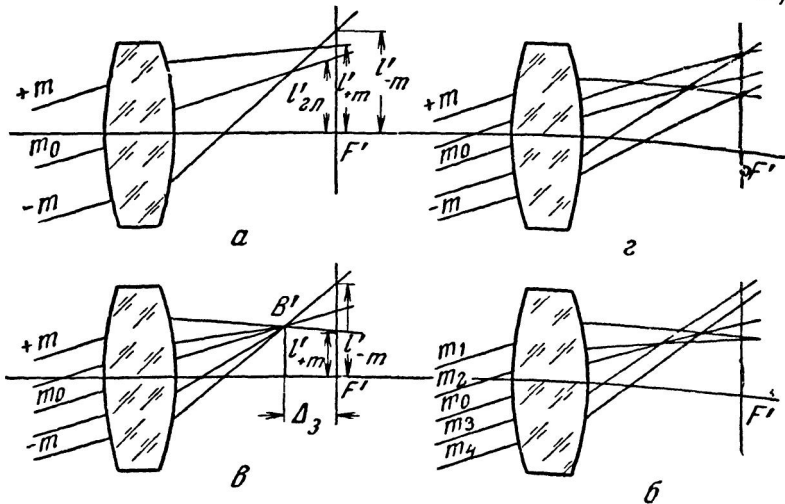


Рис 36. Аберрации наклонного пучка лучей

ким образом, что меридиональная кома, определяемая уравнением (36,1), равна нулю. Но в плоскости изображения нет одной точки, а есть пятно рассеяния  $\delta' = l'_{-m} - l'_{+m}$ .

Меридиональную кому в чистом виде можно наблюдать, когда каждая пара лучей пересекается в плоскости изображения (рис. 36,з), но точки пересечения не лежат на главном луче, а значит, отсутствует сферическая aberrация пар лучей. Только в том случае, когда все лучи пересекаются в одной точке и эта точка находится в плоскости изображения, отсутствуют и эта точка и сферическая aberrация наклонного пучка лучей в меридиональной плоскости. Аналогичным образом можно рассмотреть явление и в сагиттальной плоскости.

Из рассмотрения рис. 36 можно сделать вывод о том, что собственно меридиональную кому и сферическую aberrацию пучка в меридиональной плоскости следует рассматривать совместно. Так и делают в действительности, употребляя общий термин «кома», понимая под этим aberrации лучей в меридиональной плоскости.

Для определения погрешностей лучей вычисляют несколько наклонных лучей от  $m_1$  до  $m_k$  (рис. 36,б), направляющихся во входной зрачок оптической системы. Вверх от главного луча ординаты получают положительное значение, а вниз — отрицательное. Результаты вычисления дают ординаты этих лучей в плоскости изображения.

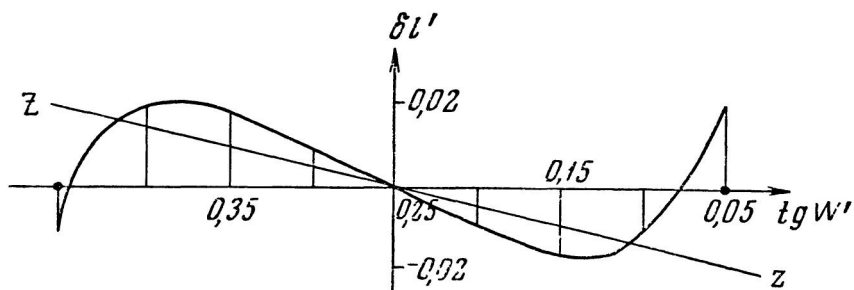


Рис. 37 Характеристическая кривая aberrаций наклонного пучка лучей в меридиональной плоскости

Откладывая по оси абсцисс величины изображений различных лучей, вышедших из одной и той же точки предмета, или их разности от теоретической величины изображения, а по оси ординат — разности углов наклона вычисляемого и главного лучей, получим характеристическую aberrацию наклонного пучка лучей. Эта кривая позволяет судить о степени коррекции оптической системы на aberrации наклонного пучка лучей.

Погрешность отдельного луча определяется

$$\delta l' = l'_m - l'. \quad (36,2)$$

Эта формула справедлива и для меридиональной и для сагиттальной плоскостей. Индекс  $m$  означает ординату на входном зрачке.

Характеристическая кривая aberrации наклонного пучка лучей в меридиональной плоскости показана на рис. 37. Вспомогательная прямая  $zz$  указывает на положение плоскости наилучшей установки  $\Delta_s$  для данного угла наклона лучей. Очевидно, что для случая, показанного на рис. 36,в, кривая превратилась бы в прямую, совпадающую со вспомогательной прямой. Но нам необходимо получить в пределах всей площади изображения наилучшую резкость. Следовательно, для всех наклонов лучей плоскость наилучшей установки должна быть в одном и том же месте. Отсюда вытекает условие: наклоны вспомогательных прямых на всех графиках поперечных aberrаций должны быть одинаковыми.

При изучении или вычислении реальных систем ограничиваются одним наклоном лучей в случае поля зрения до  $3^\circ$ , двумя наклонами при поле зрения  $30^\circ$ , тремя наклонами в случае поля зре-

ния  $60^\circ$  и т. д. Как уже указывалось, для ответственных сложных оптических систем, главным образом для фотографических объективов, необходимо знать полный контур пятна рассеяния. Для этого недостаточно ограничиться знанием aberrаций в меридиональной и сагиттальной плоскостях. Необходимо по специальным схемам вычислить косые лучи. Для этого на зрачке входа выбираются точки, для которых и вычисляются лучи. Результатом вычисления являются меридиональная и сагиттальная составляющие точки изображения, позволяющие построить контуры «точки» отражения.

На рис. 38 показаны aberrации косых лучей (внемеридиональных) лучей объектива «Иниар»  $f' = 360$  мм, 1 : 3, вычисленные для угла поля зрения  $14^\circ$ .

Слева на входном зрачке показаны точки 1, 2, 3, 4 и 5, определяющие координаты лучей, для которых был построен контур aberrаций. Для точек 1 и 2 вычисления производятся по обычным схемам вычисления главных лучей в меридиональной плоскости.

Кома является важнейшей aberrацией. Если кома и сферическая aberrация для всего отверстия и всех наклонов лучей полностью устранены, то для монохроматического света образуется безукоризненное изображение.

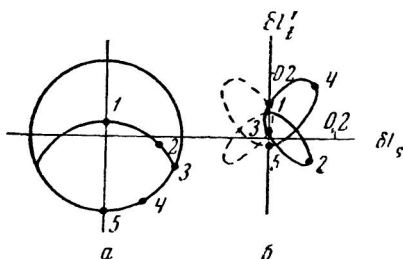


Рис 38 Aberrации косых лучей *a* — координаты на зрачке; *b* — контур пятна рассеяния

### § 37. АСТИГМАТИЗМ

*Астигматизм* называется явление, которое заключается в том, что лучи одного и того же пучка, идущие по отношению друг к другу в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, после преломления в оптической системе не собираются в одну точку, а образуют две точки схода.

В точку *C* направляется главный луч, под углом к оптической оси (рис. 39). Рассмотрим условия преломления лучей, как бы выделяемых крестообразной диафрагмой. Одни лучи, в меридиональной плоскости, падают на элементарную площадку по меридиану *mm*, а другие, в сагиттальной плоскости, падают на параллель *ss*.

Так как кривизны по параллели и меридиану различны, то и преломление лучей различно. Сагиттальные лучи образуют точку схода  $P'_s$ . В этом месте изображение представлено в виде вертикальной линии или овала. Меридиональные лучи пересекаются в точке  $P'_m$ . Здесь изображение имеет вид линии или овала, расположенного горизонтально. Астигматизм в изображении прояв-

ляется в том, что вертикальные и горизонтальные элементы изображаются различно, а точка стремится изобразиться в виде линии, а практически — в виде овала.

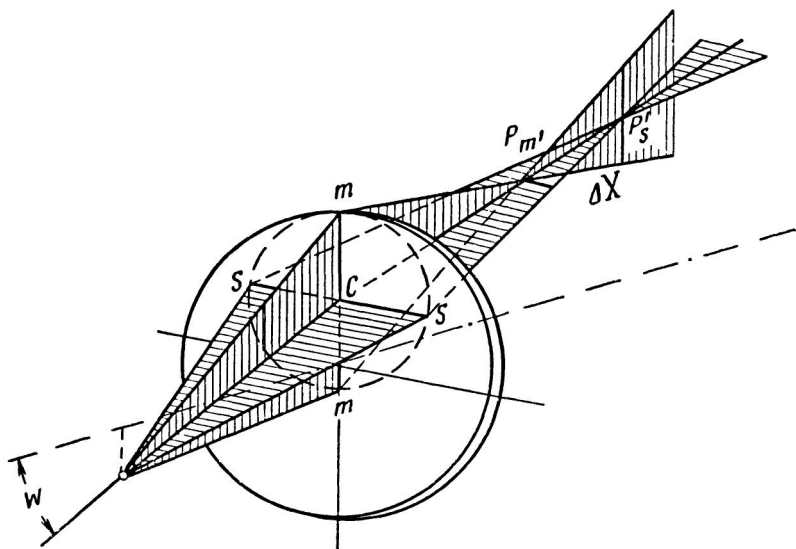


Рис. 39. Астигматизм

Расстояние между точками схода меридиональных и сагиттальных лучей  $\Delta_a$  называется *астигматической разностью*. Астигматическая разность является мерой астигматизма.

Для пучка лучей, идущего из точки на оси оптической системы, астигматизм отсутствует, так как в обоих направлениях кривизны поверхностей одинаковы. Наличие астигматизма в центре поля указывает на нарушение центрированности оптической системы. С этим явлением приходится встречаться в практике сборки оптических деталей приборов.

Для определения астигматизма в реальной оптической системе производят вычисление меридиональных и сагиттальных лучей, идущих бесконечно близко к главному лучу. Результат вычисления представляется в виде кратчайших расстояний точек фокусов меридиональных  $x'_m$  и сагиттальных  $x'_s$  лучей от плоскости изображения. Найденные значения  $x'_m$  и  $x'_s$  позволяют построить характеристические кривые астигматизма, указывающие сечения фокальных поверхностей.

На рис. 40 показаны характерные для фотографических объективов кривые астигматизма объектива «Орто-Ниар»  $f'=180$  мм;  $1:7,7$ ;  $2\omega=58^\circ$ , для положения предмета в бесконечности. Эти кривые показывают расположение фокальных поверхностей и указывают на отступление от плоского изображения.

Посередине между сагиттальной и меридиональной фокальными поверхностями располагается поверхность, в которой пятна рассеяния имеют наименьшую абсолютную величину. Такая усредненная поверхность определяет поверхность изображения и называется *кривизной поля*. Она указывает степень отступления фокальной поверхности от плоскости. Наличие кривизны поля показывает, что изображение образуется не на плоскости, а на некоторой кривой поверхности. Исправление астигматизма и кривизны поля имеет наибольшее значение для фотографических и проекционных систем, в которых изображение фиксируется или рассматривается на плоскости.

Для визуальных систем кривизна поля имеет меньшее значение, так как глаз человека, обладая способностью аккомодации, может последовательно осматривать различные участки поля изображения.

В параллельных пучках лучей астигматизм оценивается в диоптриях:

$$L_m = -\frac{1000x'_m}{f'^2} \cos \omega \quad (37,1)$$

и

$$L_s = -\frac{1000x'_s}{f'^2} \cos \omega, \quad (37,2)$$

где  $f'$  — фокусное расстояние окуляра, а  $x'_m$  и  $x'_s$  — суммарные аберрации всей оптической системы в передней фокальной плоскости окуляра. Практика показывает, что для визуальных систем изображение остается хорошим, если  $L_m$ ,  $L_s$  и разность между ними не превосходит двух диоптрий. Оптическая система, свободная от астигматизма, называется *анастигматом*.

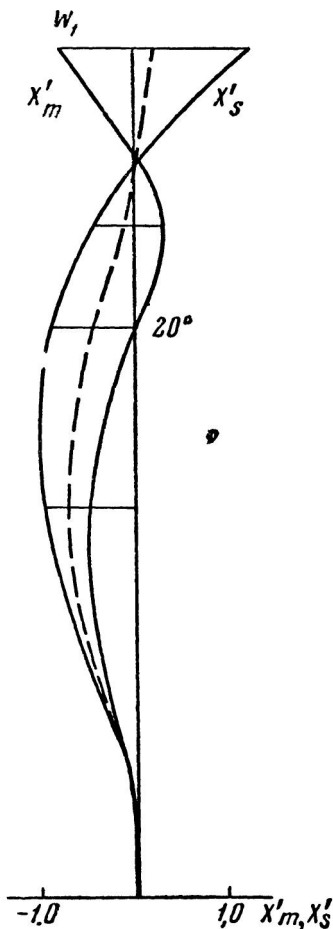


Рис. 40. Характеристические кривые аберраций астигматического бесконечно тонкого пучка лучей объектива «Орто-Нипар»  $f' = 180$  мм, 1.7,7

### § 38. ДИСТОРСИЯ

Дисторсия есть аберрация, которая проявляется в том, что нарушается подобие изображения предмету. В этом случае отношение тангенсов углов поля зрения и поля изображения не сохра-

няет своего постоянного значения для точек по всему полю изображения. Дисторсия не влияет на резкость изображения. Оптическая система, свободная от дисторсии, называется *ортоскопической*.

Дисторсия проявляется в том, что правильный квадрат изображается в виде подушки или бочки или еще более сложной фигуры.

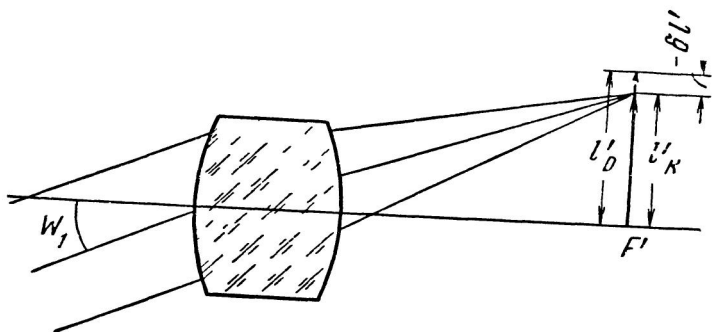


Рис 41 Дисторсия

В первом случае дисторсия называется *подушкообразной*, или *положительной*, так как величина действительного изображения больше теоретического. Во втором случае — *бочкообразной*, или *отрицательной*. Обычно одна часть изображения является бочкообразной, а другая — подушкообразной. Особо важное значение имеет дисторсия в оптических измерительных приборах, в частности в объективах для фотографических и картографических работ.

*Абсолютная дисторсия*, называемая *оптической*, выражается уравнением

$$\delta l' = l'_k - l'_0. \quad (38,1)$$

Теоретическая величина изображения  $l'_0$  (рис. 41) находится по формуле (12,5) без учета знака:

$$l'_0 = f' \operatorname{tg} \omega_1. \quad (38,2)$$

Если предмет  $l_1$  расположен на конечном расстоянии от системы, то  $l'_0$  можно найти из формулы линейного увеличения (11,1). Величина изображения  $l'_k$  вычисляется или измеряется по главному лучу, проходящему через центр входного зрачка.

Коррегирование оптических систем на абберации производят таким образом, чтобы наименьшие абберации соответствовали точке изображения на главном луче. В этом случае можно предполагать, что максимум световой энергии в пятне рассеяния также соответствует точке пересечения главного луча с плоскостью изображения.

Подставив  $V_0$  из формулы (38,2) в уравнение (38,1), получим

$$\delta l' = l'_k - f' \operatorname{tg} \omega_1. \quad (38,3)$$

В этой формуле величина  $f'$  может и не быть равна величине заднего главного фокусного расстояния, вычисляемого по нулевому лучу. Справедливость этого положения вытекает из того, что фокусное расстояние определяет масштаб изображения, и, если дисторсия пропорционально увеличивает изображение, то изменяется размер изображения, а форма его не искажается. В этом случае остаточная дисторсия называется *фотограмметрической*, или *истинной*.

В отличие от оптической, формула этой дисторсии имеет вид

$$\delta l' = l'_k - f'_k \operatorname{tg} \omega_1, \quad (38,4)$$

где  $f'_k$  — фотограмметрическое значение фокусного расстояния, в действительности указывающее на масштаб изображения.

Введение фотограмметрического фокусного расстояния всегда уменьшает дисторсию по сравнению с оптической, кроме того редкого случая, когда оптическая система в изображении имеет одновременно одинаковые положительные и отрицательные по абсолютной величине искажения. В этом случае заднее фокусное расстояние равно фотограмметрическому.

Характеристическая кривая дисторсии показана на рис. 42, где по оси абсцисс отложены величины искажения  $\delta l'$ , а по оси ординат — углы поля зрения. График дисторсии позволяет перейти от оптической дисторсии к фотограмметрической. Для этого через начало координат проводится прямая, пересекающая кривую оптической дисторсии на две половины таким образом, чтобы по отношению к этой прямой дисторсия была одинаковой по обе ее стороны.

Дисторсия равна нулю в симметричном объективе при увеличении  $\beta = -1$ . Если  $\beta \neq -1$ , то отношение фокусных расстояний половинок объектива должно быть по абсолютной величине равно линейному увеличению. Один и тот же объектив обычно используется при различных увеличениях. Для того чтобы при этом не

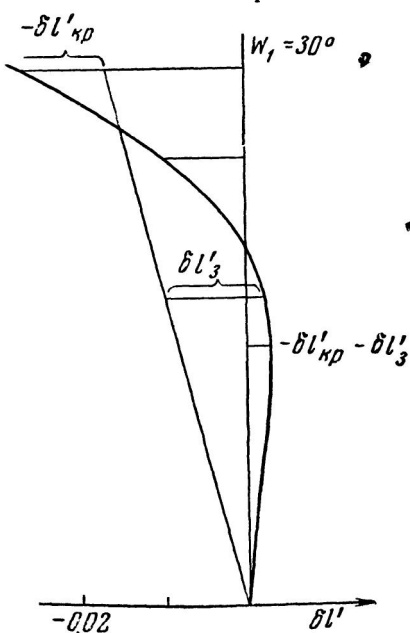


Рис. 42. График дисторсии

возникла дисторсия, нужно, чтобы отсутствовала сферическая aberrация в зрачках. Сферическая aberrация в зрачках заключается в том, что главные лучи, проходящие через центр действующей диафрагмы под различными углами, после преломления при выходе из половины объектива не пересекаются с оптической осью в центре выходного зрачка. Для определения сферической aberrации в зрачках вычисляют главные лучи из центра действующей

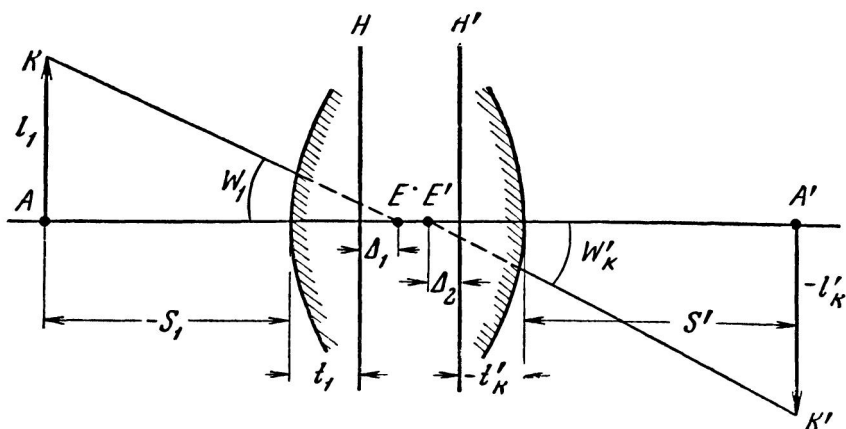


Рис. 43 Влияния сферической aberrации в зрачках на дисторсию

диафрагмы под одними и теми же углами, через левую и правую половинки объектива. Для того чтобы главный луч, направляющийся в центр входного зрачка, выходил из центра зрачка системы под тем же углом, необходимо, чтобы зрачки совпадали с главными плоскостями оптической системы, так как угловое увеличение в главных плоскостях равно 1. При этих условиях дисторсия объектива зависит от линейного увеличения aberrации в зрачках и углов поля зрения и изображения.

На рис. 43 в соответствии с общепринятыми правилами знаков показаны отрезки и углы, известные из вычислений главных лучей.

Луч  $KE$  есть главный луч, проходящий через переднюю половину объектива, а луч  $E'K'$  — через заднюю половину объектива,  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  — сферическая aberrация в зрачках,  $H$  и  $H'$  — плоскости входного и выходного зрачков. В общем случае углы  $w_1$  и  $w'_k$  не равны друг другу.

Для определения дисторсии всего объектива определим дисторсию передней половины, затем ее перенесем с учетом линейного увеличения в пространство изображения и прибавим собственно дисторсию задней половины объектива. Величина  $l_1$  есть величина действительного предмета. Из рис. 43 следует:

$$l_1 = (t_1 - s_1) \operatorname{tg} w_1.$$



Величина же теоретического предмета находится по формуле

$$l_0 = (t_1 + \Delta_1 - s_1) \operatorname{tg} \omega_1.$$

Разность этих предметов есть дисторсия передней половины объектива, т. е.

$$\delta l_I = -\Delta_1 \operatorname{tg} \omega_1.$$

Таким же образом найдем дисторсию задней половины объектива:

$$\delta l'_{II} = \Delta_2 \operatorname{tg} \omega'_k. \quad (38,5)$$

Дисторсия передней половины объекта в плоскости изображения  $A'$  увеличена пропорционально увеличению

$$\delta l'_I = -\Delta_1 \beta \operatorname{tg} \omega_1. \quad (38,6)$$

Дисторсия объектива в целом

$$\begin{aligned} \delta l' &= \delta l'_I + \delta l'_{II}, \\ \delta l' &= \Delta_2 \operatorname{tg} \omega'_k - \Delta_1 \beta \operatorname{tg} \omega_1. \end{aligned} \quad (38,7)$$

Если объектив строго симметричен, то  $\Delta_1 = -\Delta_2$  и  $\omega_1 = \omega'_k$ , тогда, согласно уравнению (38,7),

$$\delta l' = \Delta_2 (1 + \beta) \operatorname{tg} \omega_1. \quad (38,8)$$

**Пример 18.** Дисторсия симметричного объектива при масштабе съемки 1 : 2 в пределах некоторого поля зрения составляет 0,08 мм. Определить дисторсию этого объектива в пределах этого же поля зрения для масштаба съемки 2 : 1.

**Решение.** Дано:  $\delta l'_1 = 0,08$  мм,  $\beta_1 = -0,5$ .

Необходимо найти  $\delta l'_2$  при  $\beta_2 = -2$ .

На основании формулы (38,8) имеем

$$\delta l'_2 = \frac{\delta l'_1 (1 + \beta_2)}{1 + \beta_1} = -0,16 \text{ мм.}$$

### § 39. ХРОМАТИЧЕСКАЯ АБЕРРАЦИЯ

Оптическая система, преломляя лучи света и разлагая белый свет на составные части, смещает изображения в различных лучах спектра относительно друг друга. Это явление называется *хроматической aberrацией*, или *хроматизмом*. Хроматическая aberrация проявляется в окрашивании изображения.

Аберрации, ранее рассмотренные для монохроматического света, характерны для всех лучей спектра. Но полный анализ всех aberrаций для лучей с определенными длинами волн был бы весьма сложен, поэтому ограничиваются рассмотрением отдельных видов хроматической aberrации.

Основными видами хроматической aberrации являются: 1) хроматизм положения, или хроматическая aberrация нулевых лучей; 2) хроматическая разность сферических aberrаций; 3) хроматизм увеличения; 4) хроматическая разность aberrаций наклонных лучей в меридиональной плоскости. В особых случаях рассматривают и астигматизм цветных лучей.

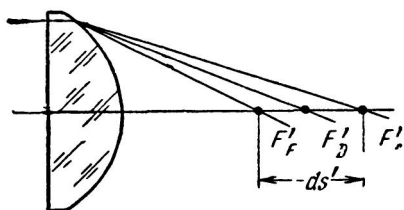


Рис 44 Хроматическая aberrация

Если приборы предназначаются для фотографирования изображения в других лучах спектра (инфракрасных, ультрафиолетовых, лучах Рентгена и др.), то хроматизм рассматривается для лучей с соответствующей длиной волны.

Если луч света падает на линзу на конечном расстоянии от оптической оси (рис. 44), то при разложении на составные части он образует различные точки пересечения с оптической осью  $F'_F$ ,  $F'_D$ ,  $F'_C$  и т. д.

Хроматическая aberrация положения по оптической оси находится по формуле

$$ds' = s'_\lambda - s'_{0,D}. \quad (39,1)$$

Хроматическая aberrация положения всегда определяется по отношению к положению теоретической плоскости изображения. Эта плоскость от оптической системы расположена на расстоянии  $s'_{0,D}$ . Если за основной луч принимается не желтый  $D$ , а какой-нибудь иной, то вместо  $s'_{0,D}$  принимается луч  $s'_{0,\lambda}$ .

Хроматическая aberrация положения одиночной тонкой линзы для бесконечно удаленного предмета может быть найдена путем дифференцирования формулы (20,1), при  $d=0$ :

$$df'_{xp} = -\frac{dnf'}{n-1}.$$

Заменяя  $\frac{n-1}{dn} = v$  по формуле (7.2), получим

$$df'_{xp} = -\frac{f'}{v}. \quad (39,2)$$

Разность положения фокусов нулевых лучей различных длин волн по оптической оси указывает на хроматизм положения оптической системы любой сложности.

Комбинируя положительные и отрицательные линзы с различным коэффициентом дисперсии, удается в значительной степени уменьшить хроматизм положения. Такие оптические системы называются *ахроматическими*, а объективы — *ахроматами*. Процесс исправления хроматической aberrации называется *ахроматизацией*. Хроматическую aberrацию нулевых лучей можно изобразить

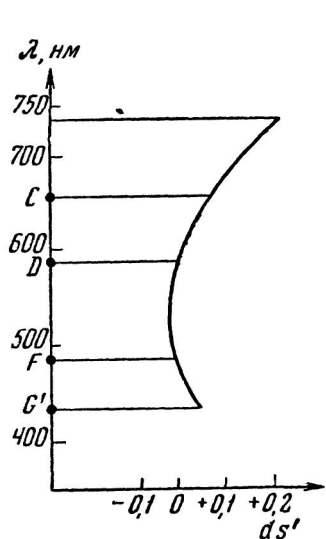


Рис 45 Хроматизм положения и вторичный спектр

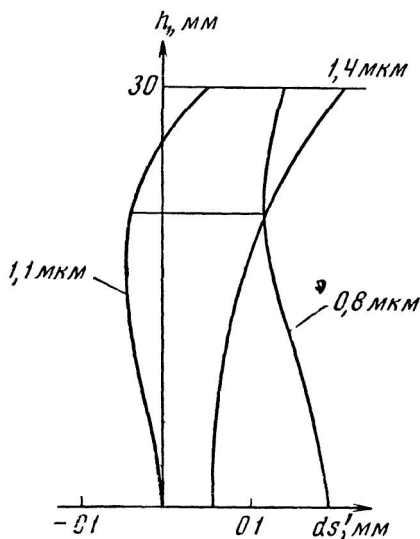


Рис 46 Сферохроматическая aberrация объектива пеленгатора  $f' = 360$  мм.

1 6

жать графически, откладывая по оси ординат длины волн, а по оси абсцисс хроматическую aberrацию вдоль оптической оси. Хроматическая кривая хроматизма положения ахроматической системы показана на рис. 45.

Здесь для двух лучей спектра хроматизм отсутствует, например для лучей спектра  $G'$  и  $C$  или для лучей с длинами волн 450 и 620 нм.

Если для двух лучей спектра хроматическая aberrация положения уничтожена, то остаточная хроматическая aberrация называется *вторичным спектром*. При этом рассматривают весь участок изучаемого спектра. Так, например, на рис 45, рассматривая ахроматизацию в пределах лучей спектра  $G'$  и  $C$ , имеем вторичный спектр в 0,09 мм. Часто график хроматизма положения называют графиком вторичного спектра. Если хроматизм положения исправлен для трех лучей спектра, то остаточную aberrацию называют третичным спектром и т. д. Но не только для нулевых лучей должен быть исправлен хроматизм, он должен быть исправлен и для всех осевых и наклонных пучков лучей.

Полного устранения хроматической aberrации в наклонных пучках достигнуть не удастся. Разности величин изображения, образованных различными лучами спектра, должны быть существенно малы. Кроме того, эти изображения должны быть расположены в одной плоскости.

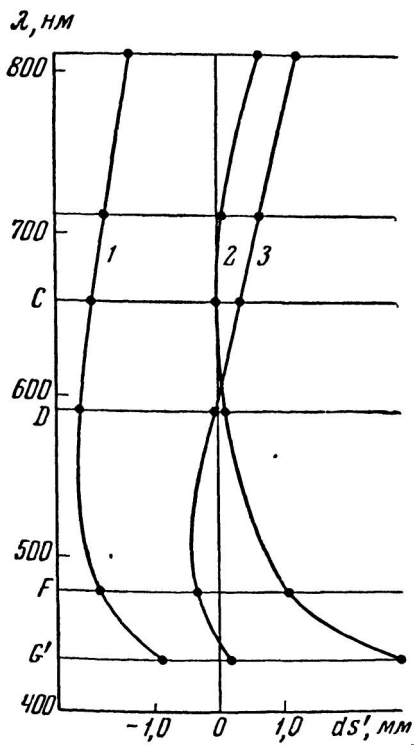


Рис. 47. Хроматическая aberrация фотообъектива «Индустар-17»,  $f' = 500$  мм, 1 : 5; 1 — зона, 2 — край, 3 — ось

Часто характеристические кривые хроматической разности сферических aberrаций показываются на графике вторичного спектра (рис. 47). Здесь показана хроматическая aberrация фотографического объектива «Индустар-17»,  $f' = 500$  мм, 1 : 5. В обоих случаях идеальным было бы то положение, если бы все три кривые выпрямились, сделались вертикальными и слились бы вместе.

Для точек изображения вне оптической оси существуют те же причины возникновения хроматизма. На оптической оси встречаемся с окрашиванием кружков рассеяния, а вне оптической оси — с окрашиванием пятен рассеяния.

Если оптическая система образует совпадающие изображения для различных лучей спектра, например для трех, то она называется *апохроматом*. Апохромат, как правило, имеет уменьшенный вторичный спектр, а если его хроматизм положения характеризуется третичным спектром, то он значительно меньше вторичного. Апохроматы предназначаются для фотографирования цветных картин (полиграфия, кинематография, телевидение).

Лучи, падающие на линзу, на различных высотах преломляются, разлагаясь на составные части по-разному. Это явление аналогично сферической aberrации и может быть графически показано на графике сферической aberrации (рис. 46). Оно называется *сферохроматической aberrацией*. Иногда разность сферических aberrаций для различных лучей спектра называют *хроматической разностью сферических aberrаций*. Она полностью характеризует резкость изображения точки на оптические оси.

Наклонный пучок лучей также разлагается на составные части, и лучи с различной длиной волны пересекают плоскость изображения в различных точках. Разность величин цветных изображений называется *хроматизмом увеличения* (рис. 48)

$$dl' = l'_F - l'_C, \quad (39,3)$$

или в общем случае

$$dl' = l'_{\lambda_1} - l'_{\lambda_2}. \quad (39,4)$$

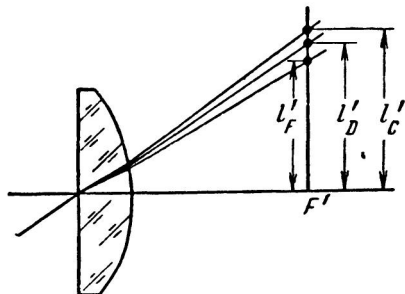


Рис. 48. Хроматизм увеличения

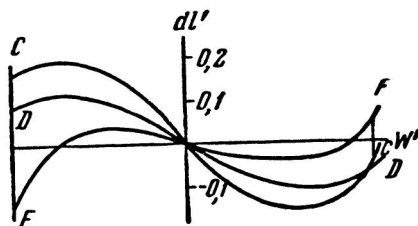


Рис. 49. Хроматическая разность aberrаций наклонных лучей

При рассмотрении хроматизма увеличения учитывают хроматическую разность aberrаций наклонных лучей в меридиональной плоскости. Это явление аналогично меридиональной коме и сферической aberrации наклонного пучка лучей, но рассматривается для различных длин волн. Она может быть графически показана на графике меридиональной комы (рис. 49). В данном примере для главного луча хроматизм увеличения отсутствует, но хроматическая aberrация наклонных лучей значительна, и можно предполагать, что изображение точки окрашено.

Исправление aberrаций в оптической системе для видимой части спектра называется *оптической*, или *визуальной*, коррекцией. Для этой части спектра (C, D и F) производят исправление хроматизма в приборах, работающих совместно с глазом человека, а также фотографических объективах, предназначенных для съемок на панхроматических и цветных светочувствительных материалах. В остальных случаях мы встречаемся с *активной*, или *фотографической*, коррекцией.

Фотографические объективы для обычной штриховой, тоновой и полутонной съемки исправляются для лучей спектра D и G, так как диапозитивные эмульсии мало чувствительны к красным лучам спектра.

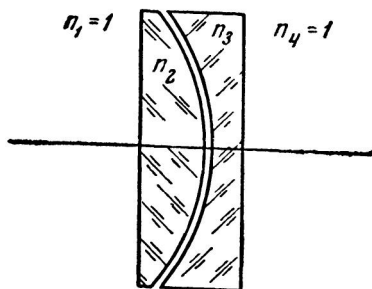


Рис. 50. Гиперхроматическая линза  $f' = \infty$ ,  $n_2 = n_3$ ,  $v_2 \neq v_3$

Объективы апохроматы для полиграфических репродукционных цветных съемок должны иметь исправление для лучей спектра от  $C$  до  $G'$ . Специальные объективы для съемок в инфракрасных лучах спектра имеют диапазон длин волн, соответствующий условиям работы. При этом за основной луч во многих случаях выбирают не  $D$ , а луч, соответствующий максимуму светочувствительности при съемке. В таких случаях рассматривают совместно спектральные свойства светофильтров, фотокатодов или фотографических слоев и на основании этого выбирают длину волны света, соответствующую максимуму освещенности в плоскости изображения.

Для осуществления перехода от одного состояния коррекции в другое служит *гиперхроматическая* линза (рис. 50) с оптической силой, равной нулю. Показатели преломления ее составляющих для основного луча равны, но коэффициенты дисперсии различны, вследствие этого она влияет на изменение хроматизма положения той системы, совместно с которой применяется.

#### § 40. РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

*Разрешающей способностью*, или разрешающей силой, называется способность оптической системы изображать отдельно две точки.

Если аберрации в системе полностью отсутствуют, то дифракция света устанавливает предел разрешению. Влияние дифракции света на разрешающую способность и теория последней рассматриваются в физической оптике.

Для нахождения разрешающей способности объектива воспользуемся формулой разрешаемого углового расстояния для самосвещающихся объектов \*

$$\sin \psi = \frac{1,22\lambda}{D}, \quad (40,1)$$

где  $D$  — диаметр входного зрачка. Этой формуле соответствует такое положение дифракционных колец в изображении, когда первое темное кольцо одного кружка проходит через центр другого.

Максимум спектральной чувствительности глаза соответствует  $\lambda = 560$  нм. Подставив в формулу (40,1)  $\lambda = 560$  нм, выразив угол  $\psi$  в секундах, а диаметр входного зрачка в миллиметрах, получим известную формулу, определяющую разрешающую способность объектива (в секундах):

$$\psi = \frac{140}{D}. \quad (40,2)$$

В некоторых случаях, например в геодезии, принимают

$$\psi = \frac{122}{D}. \quad (40,3)$$

\* См. Г. С. Ландсберг. Оптика. М.—Л., Гостехиздат, 1947, стр. 196.

Опыт показал справедливость этой формулы. Реальные оптические системы не превзошли этот предел, но многие геодезические и астрономические объективы его достигли.

Разрешающую способность оптических приборов определяют при помощи тест-объектов абсолютного контраста в виде так называемых *мир*. Различаются миры *штриховые* (рис. 51,а) и *ра-*

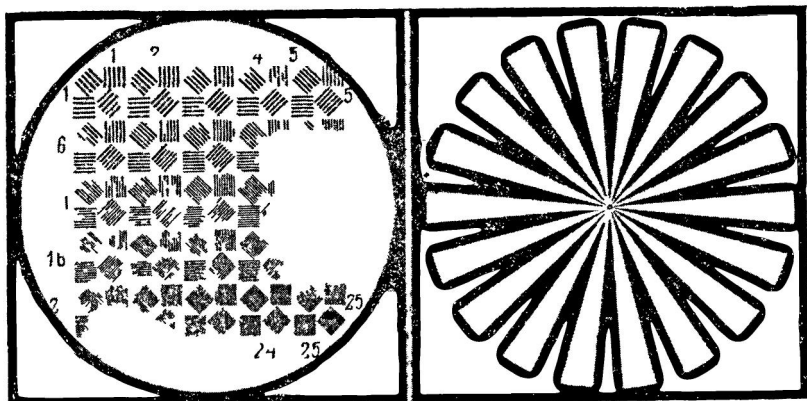


Рис 51 Миры а — штриховая, б — радиальная

*диальные* (рис. 51,б). Штриховая мира представляет собой группу семейств разноразмещенных штрихов. Штрихи четырех семейств ориентированы друг по отношению к другу под углом  $45^\circ$ . В пределах одного семейства штрихи параллельны и одинаковы по ширине. Таких групп семейств обычно бывает 16 или 25. Ширина штрихов от группы к группе растет в геометрической прогрессии.

Между серединами любых пар одноименных штрихов и разрешающей способностью в угловой мере имеется простая зависимость

$$\delta = p \operatorname{tg} \psi, \quad (40,4)$$

или

$$\delta = f' \operatorname{tg} \psi. \quad (40,5)$$

Мира может непосредственно наблюдаться на расстоянии  $p$  от глаза или объектива испытуемого прибора или устанавливаться в фокальной плоскости объектива коллиматора с фокусным расстоянием  $f'$ .

Разрешающая способность  $N$  в последнем случае определяется формулой

$$N = \frac{1}{f' \operatorname{tg} \psi}. \quad (40,6)$$

Штриховая мира весьма удобна для практических измерений разрешающей способности любых оптических приборов.

Радиальная мира преимущественно применяется для испытания фотографических объективов. Допустим, что диаметр разрешаемого круга  $H$ . В пределах длины окружности  $\pi H$  имеется  $m$  черных штрихов. За величину разрешения, как и ранее, принимается расстояние между центрами черных (или белых) штрихов. Отсюда ширина штриха

$$d = \frac{\pi H}{2m}, \quad (40,7)$$

а разрешаемое расстояние

$$\delta = \frac{\pi H}{m}. \quad (40,8)$$

Переходя к числу штрихов на 1 мм, получим

$$N = \frac{m}{\pi H}. \quad (40,9)$$

**Пример 19.** Определить разрешающую способность объектива в линиях на миллиметр, если фотографирование радиальной миры с числом секторов 72 дало неразрешаемый «круг» по наибольшему размеру в 1,04 мм.

**Решение.** Применим формулу (40,9)

$$N = 22 \text{ лин/мм.}$$

#### § 41. ВЫЧИСЛЕНИЕ ДВУХЛИНЗОВОГО СКЛЕЕННОГО ОБЪЕКТИВА

Двухлинзовый склеенный объектив наиболее часто встречается во всевозможных оптических приборах. Простота конструкции, возможность коррегирования его на хроматическую и сферическую абберации сделали его основным узлом различных оптических систем.

Каждый объектив характеризуется фокусным расстоянием (точнее, величиной заднего главного фокусного расстояния) и относительным отверстием. С конструктивной стороны объектив характеризуется диаметром, толщиной линз и радиусами кривизны. Толщина линз устанавливается в зависимости от диаметра объектива. Один из радиусов кривизны обеспечивает постоянство фокусного расстояния. Два других радиуса могут быть использованы как параметры для исправления аббераций. Таким образом, двухлинзовый склеенный объектив при заранее выбранной паре сортов оптического стекла как материала для деталей имеет два параметра для исправления аббераций. Этими двумя параметрами вместо радиусов для удобства вычислений являются углы нулевого луча с оптической осью. Оперирова двумя параметрами, можно исправить какие-нибудь две абберации. Таковыми обычно являются сферическая абберация для луча, идущего по краю отверстия объектива, и хроматическая разность сферических аббер-



раций лучей спектра с длиной волны  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  (для видимой области спектра  $S$  и  $F$ ), идущих в объектив на высоте, равной 0,7 высоты луча, идущего по краю отверстия.

Объектив (рис. 52) представляет собой комбинацию двух линз, склеенных между собой пихтовым бальзамом или бальзаминном.

Положительная линза—из крона, отрицательная—из флинта. С точки зрения коррекции комбинации «крон—флинт» или «флинт—крон», строго говоря, не тождественны, но практически особых преимуществ комбинация «флинт впереди» не имеет. Но так как крон в большинстве случаев значительно более устойчив против механических, атмосферных и других воздействий, то комбинация «крон впереди» получила всеобщее распространение.

Также надо сказать, что с точки зрения коррекции, данным условиям работы объектива (относительное отверстие, положение зрачка входа) соответствует определенная комбинация марок оптического стекла, которая позволяет получить лучшее выполнение условий синусов. Однако практически оказывается возможным ограничиться немногими комбинациями марок оптического стекла.

Из теории аберраций 3-го порядка известна формула хроматизма положения ( $f' = h_1$ ;  $\alpha_1 = 0$ ;  $\alpha'_m = 1$ )

$$ds' = \sum_{k=1}^{k=m} h_k U_k, \quad (41,1)$$

где

$$U_k = \frac{\alpha_{k+1} - \alpha_k}{\mu_{k+1} - \mu_k} \left( \frac{1 - \mu_{k+1}}{\nu_{k+1}} - \frac{1 - \mu_k}{\nu_k} \right)^* \quad (41,2)$$

и

$$\mu_k = \frac{1}{n_k}. \quad (41,3)$$

Из формулы (41,1), принимая, что хроматизм равен нулю, получим

$$\sum_{k=1}^{k=3} h_k U_k = 0.$$

Оптическую систему будем полагать тонкой, предмет расположен в бесконечности, предмет и изображение — в воздухе, а фо-

\* Здесь  $\nu = \frac{n_{\lambda_0} - 1}{n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}}$  и  $\mu = \frac{1}{n_{\lambda_0}}$ .

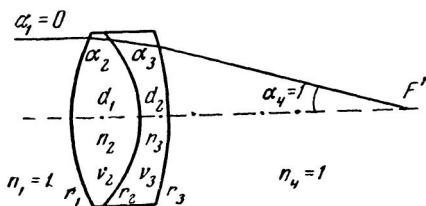


Рис 52. Двухлинзовый склеенный объектив

кусное расстояние примем за единицу ( $f'=1$ ). Так как  $d=0$  и  $h_1=h_2=h_3=1$ , то хроматизм положения выражается уравнением

$$\sum_{k=1}^{k=3} U_k = 0. \quad (41,4)$$

Раскроем значение  $U$ . Из (41,2) следует:

$$U_1 = -\frac{\alpha_2}{\nu_2},$$

$$U_2 = \frac{\alpha_3 - \alpha_2}{\mu_3 - \mu_2} \left( \frac{1 - \mu_3}{\nu_3} - \frac{1 - \mu_2}{\nu_2} \right),$$

$$U_3 = -\frac{1 - \alpha_3}{\nu_3}.$$

Подставляя в (41,4), получим

$$-\frac{\alpha_2}{\nu_2} + \frac{\alpha_3 - \alpha_2}{\mu_3 - \mu_2} \left( \frac{1 - \mu_3}{\nu_3} - \frac{1 - \mu_2}{\nu_2} \right) - \frac{1 - \alpha_3}{\nu_3} = 0.$$

После преобразования

$$\alpha_3(1 - \mu_2)(\nu_2 - \nu_3) - \alpha_2(1 - \mu_3)(\nu_2 - \nu_3) - (\mu_3 - \mu_2)\nu_2 = 0.$$

Разделив на  $(\nu_2 - \nu_3)$  и обозначив

$$\varphi = \frac{\nu_2}{\nu_2 - \nu_3}, \quad (41,5)$$

получим

$$\alpha_3(1 - \mu_2) - \alpha_2(1 - \mu_3) - (\mu_3 - \mu_2)\varphi = 0. \quad (41,6)$$

Примем для углов  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  значения

$$\alpha_2 = (1 - \mu_2)Q + \varphi, \quad (41,7)$$

$$\alpha_3 = (1 - \mu_3)Q + \varphi, \quad (41,8)$$

где  $Q$  — некоторый численный параметр.

Значения  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  введем в уравнение (41,6) и докажем справедливость выражений (41,7) и (41,8):

$$[(1 - \mu_3)Q + \varphi](1 - \mu_2) - [(1 - \mu_2)Q + \varphi](1 - \mu_3) - (\mu_3 - \mu_2)\varphi = 0.$$

Преобразуя, получим тождество

$$\varphi(\mu_3 - \mu_2) = \varphi(\mu_3 - \mu_2).$$

Следовательно, формулы (41,7) и (41,8) справедливы.

Эти формулы позволяют легко осуществить вычисление объектива тригонометрическим методом. Два параметра,  $Q$  и  $\varphi$ , позволяют исправить в объективе две аберрации. Коэффициент  $\varphi$ , зависящий от коэффициентов обратных относительных дисперсий  $\nu$ ,

является параметром хроматической aberrации, а  $Q$  — сферической aberrации.

Методы вычисления двухлинзового склеенного объектива для видимой области спектра хорошо и подробно разработаны Г. Г. Слюсаревым\*.

Для других же областей спектра аналогичных разработок не имеется и выбор комбинации марок оптического стекла приходится делать на основании соображений об исправлении вторичного спектра.

Для объективов, предназначенных для работы в невидимой области спектра, обычно необходимо выполнить исправление сферохроматической aberrации, поэтому основным в расчете объектива является исправление хроматизма положения и сферической aberrации.

Вторичный спектр, как известно, в двухлинзовом склеенном объективе определяется формулой

$$ds' = \frac{\frac{n_{3\lambda_0} - n_{3\lambda_2}}{n_{3\lambda_1} - n_{3\lambda_2}} - \frac{n_{2\lambda_0} - n_{2\lambda_2}}{n_{2\lambda_1} - n_{2\lambda_2}}}{v_3 - v_2} f', \quad (41,9)$$

где  $\lambda_0$  — длина волны луча, принятая за основную, а  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — длины волн, ограничивающих рассматриваемую область спектра.

Числитель последнего уравнения состоит из разностей частных относительных дисперсий, известных по каталожным данным. Поэтому выбор оптимальной комбинации марок оптического стекла может быть совершен заранее.

Однако следует предупредить, что выполнение условия  $ds=0$  обычно приводит к значительной кривизне радиуса склейки, что делает невозможным исправление сферической aberrации, поэтому отыскивается компромиссное решение между исправлением вторичного спектра и исправлением сферической aberrации.

В некоторых случаях необходимо иметь заданный хроматизм положения:  $ds=C$ , тогда aberrационный параметр  $\Phi$  определяется выражением

$$\Phi_1 = \frac{v_2}{v_2 - v_3} (1 + v_3 C), \quad (41,10)$$

где  $C$  принимается в масштабе  $f'=1$ , т. е.

$$C = \frac{ds'}{f'}. \quad (41,11)$$

Параметр же  $Q$ , характеризующий сферическую aberrацию, находится из уравнения

$$aQ^2 + bQ + e - P = 0, \quad (41,12)$$

\* См Г. Г. Слюсарев. Методы расчета оптических систем Л.—М., ОНТИ, 1937.

где

$$a = 2(\mu_2 - \mu_3)\varphi_1 + 2\mu_3 + 1, \quad (41,13)$$

$$b = \frac{1}{n_3 - 1} \left[ \frac{3(n_3 - n_2)}{n_2 - 1} \varphi_1^2 + 2(n_3 + 2)\varphi_1 - (2n_3 + 1) \right] \quad (41,14)$$

и

$$e = \frac{n_3^2}{(n_3 - 1)^2} \left[ \frac{(n_3 - n_2)(n_2 n_3 - 1)}{n_3^2 (n_2 - 1)^2} \varphi_1^3 + (n_3 + 2)\mu_3 \varphi_1^2 - (2n_3 + 1)\mu_3 \varphi_1 + 1 \right]. \quad (41,15)$$

Величина  $P$  определяется из условия исправления сферической аберрации.

Из теории аберраций 3-го порядка известна формула сферической аберрации ( $\alpha'_m = 1$ ;  $n_1 = n_{m+1} = 1$ )

$$\delta s_{III}' = -\frac{1}{2} \text{tg}^2 u' \sum_{k=1}^{k=3} h_k P_k, \quad (41,16)$$

где

$$P_k = \left( \frac{\alpha_{k+1} - \alpha_k}{\mu_{k+1} - \mu_k} \right)^2 (\alpha_{k+1} \mu_{k+1} - \alpha_k \mu_k). \quad (41,17)$$

При определении  $P$  полагаем  $d_1 = d_2 = 0$  и  $h_1 = h_2 = h_3 = 1$ , тогда

$$\sum_{k=1}^{k=3} h_k P_k = P,$$

или

$$P = -\frac{2\delta s_{III}'}{\text{tg}^2 u'}. \quad (41,18)$$

Решение уравнения (41,12) дает два значения  $Q$ . Из этих значений принимаем  $Q$  меньшее по абсолютной величине. Если квадратное уравнение (41,12) не имеет решения, то экстремальное значение  $Q_0$  находится путем его дифференцирования, т. е.

$$Q_0 = -\frac{b}{2a}. \quad (41,19)$$

Если при найденных значениях  $\varphi_1$  и  $Q$  сферическая аберрация велика, то она может быть уменьшена путем интерполирования по  $Q$ , а в случае оперирования с  $Q_0$  — путем изменения пары марок оптического стекла.

Вычисление объектива покажем отдельно по операциям:

1. Выбор марок оптического стекла линз объектива. В качестве первой линзы рекомендуется принимать кроновое стекло как более устойчивое против атмосферных влияний.

Подбор комбинации пары марок стекла следует делать на основании их частных относительных дисперсий, стремясь получить их разность, близкую к нулю. Для объективов в ближней инфракрасной области ( $\lambda=0,8\div 2,4$  мкм) рекомендуется пара стекол марок ФК4 и ОФ3.

2. Установление толщин линз. Толщина положительной (первой) линзы устанавливается с тем расчетом, чтобы при данном диаметре  $D$  толщина по краю была не меньше величины  $d_0$ , указанной в табл. 2.

Таблица 2

Диаметр линзы, мм	$d_0$	Диаметр линзы, мм	$d_0$
До 6 . . . . .	0,5	Свыше 30 до 50 . . . . .	2,0
Свыше 6 до 10 . . . . .	0,8	Свыше 50 до 80 . . . . .	2,5
Свыше 10 до 18 . . . . .	1,2	Свыше 80 до 120 . . . . .	3,0
Свыше 18 до 30 . . . . .	1,5	Свыше 120 . . . . .	4,0

Тогда толщину по центру можно найти по формуле

$$d_1 = 0,75 \frac{D^2}{f'} + d_0, \quad (41,20)$$

округляя в сторону увеличения до целого числа.

Толщина второй отрицательной линзы устанавливается с тем расчетом, чтобы при ее изготовлении не происходило «коробления» цвета поверхности, т. е. линза была бы достаточно прочна, не деформировалась. Для этого толщину отрицательной линзы в зависимости от ее диаметра рекомендуется брать из табл. 3.

Таблица 3

Диаметр линзы, мм	$d_2$	Диаметр линзы, мм	$d_2$
До 6 . . . . .	0,6	Свыше 30 до 50 . . . . .	4
Свыше 6 до 10 . . . . .	1,0	Свыше 50 до 80 . . . . .	6
Свыше 10 до 18 . . . . .	2,0	Свыше 80 до 120 . . . . .	10
Свыше 18 до 30 . . . . .	2,5	Свыше 120 . . . . .	15

3. Определение аберраций объектива. Вследствие сложности данного вопроса ограничимся здесь лишь общими соображениями.

Обычно выбирают величину сферической аберрации  $\delta s'$  для луча, падающего на объектив на высоте  $h_{кр}=D/2$ , и хроматическую разность сферических аберраций  $\delta s'=0$  для лучей спектра  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , идущих на высоте  $h_{зона}=0,7 h_{кр}$ .

В случае малосветосильных объективов с относительным отвер-

стием не более 1 : 6 рекомендуется иметь  $\delta s' = 0$ . В случае более светосильных объективов  $\delta s'$  должна быть положительна и тем больше, чем больше относительное отверстие.

Таблица 4 дает представление о величинах продольной сферической аберрации, имеющейся у ряда объективов с большим относительным отверстием, для луча, идущего по краю объектива (для видимой области спектра).

Таблица 4

Относительное отверстие	$\delta s'; z f'$	Относительное отверстие	$\delta s'; z f'$
	$z$		$z$
1:2,0	0,0150	1:3,3	0,0030
1:2,2	0,0100	1:3,5	0,0020
1:2,5	0,0080	1:4,0	0,0010
1:2,7	0,0060	1:4,5	0,0006
1:3,0	0,0040	1:5,0	0,0003

Если за объективом установлена призма (эквивалентная плоскопараллельной пластине), то ее аберрации следует учесть, принимая  $\delta s'$  и  $ds'$  отрицательными, так как аберрации призмы положительны. При этом сферическая аберрация призмы определяется по формуле

$$\delta s' = \frac{1}{2} d \mu (1 - \mu^2) \sin u' \operatorname{tg} u', \quad (41,21)$$

а хроматическая по формуле

$$ds' = \frac{d}{v} \cdot \frac{n-1}{n^2}, \quad (41,22)$$

где  $d$  — длина хода луча в призме.

4. Определение  $h_{\text{кр}}$  и  $h_{\text{зона}}$ .

$$h_{\text{кр}} = \frac{D}{2} \quad \text{и} \quad h_{\text{зона}} = 0,35 D.$$

5. Вычисление  $C$  по формуле (41,11).

6. Определение  $\varphi_1$  по формуле (41,10).

7. Вычисление  $a$  по формуле (41,13).

8. Вычисление  $b$  по формуле (41,14).

9. Вычисление  $e$  по формуле (41,15).

10. Определение  $P$  по формуле (41,18).

11. Составление квадратного уравнения вида (41,12).

12. Решение квадратного уравнения, нахождение его корней. В дальнейшем принимается  $Q$  меньше по абсолютной величине.

13. Вычисление  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  по формулам

$$\alpha_2 = (1 - \mu_2)Q + \Phi_1,$$

$$\alpha_3 = (1 - \mu_3)Q + \Phi_1.$$

14. Вычисление высот для расчета радиусов:

$$h_1 = f',$$

$$h_2 = f' - \alpha_2 d_1,$$

$$h_3 = h_2 - \alpha_3 d_2.$$

15. Вычисление радиусов по формуле

$$r_k = h_k \frac{n_{k+1} - n_k}{\alpha_{k+1} n_{k+1} - \alpha_k n_k}.$$

Вычисления, указанные в пп. 14 и 15, удобно вести по схеме 2 вычисления радиусов.

Вычисление радиусов						Схема 2
Дано:		$\alpha_1 = 0$	$n_1 = 1$			
		$\alpha_2$	$d_1$	$n_2$	$h_1 = f'$	•
		$\alpha_3$	$d_2$	$n_3$		
		$\alpha_4 = 1$		$n_4 = 1$		
$\alpha_1 = 0$	$\alpha_1 n_1 = 0$	$\alpha_2 n_2 - \alpha_1 n_1 = \alpha_2 n_2$	$\alpha_2 d_1$	$h_1 = f'$	$h_2 = f' - \alpha_2 d_1$	$n_1 = 1$
$\alpha_2$	$\alpha_2 n_2$	$\alpha_3 n_3 - \alpha_2 n_2$	$\alpha_3 d_2$	$h_2 = f' - \alpha_2 d_1$	$h_3 = h_2 - \alpha_3 d_2$	$r_1$
$\alpha_3$	$\alpha_3 n_3$	$\alpha_4 n_4 - \alpha_3 n_3 = 1 - \alpha_3 n_3$				$d_1$
$\alpha_4 = 1$	$\alpha_4 n_4 = 1$					$n_2$
						$r_2$
						$d_2$
						$n_3$
						$r_3$
	$\lg(n_2 - n_1)$	$\lg(n_3 - n_2)$		$\lg(n_4 - n_3)$		$n_4 = 1$
	$\lg h_1$	$\lg h_2$		$\lg h_3$		
	$\frac{\text{clg}(\alpha_2 n_2 - \alpha_1 n_1)}{\lg r_1}$	$\frac{\text{clg}(\alpha_3 n_3 - \alpha_2 n_2)}{\lg r_2}$		$\frac{\text{clg}(\alpha_4 n_4 - \alpha_3 n_3)}{\lg r_3}$		

16. Вычисление нулевых лучей  $\lambda_0$ ,  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  производится по схеме 3.

17. Вычисление крайних лучей  $\lambda_0$ ,  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  производится по схеме 4 при  $h_1 = h_{\text{кр}}$  и  $h_1 = h_{\text{зона}}$ , причем показатели преломления берутся соответственно лучам  $\lambda_0$ ,  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ .

18. Составление таблицы aberrаций.

19. Вычерчивание графика aberrаций, подобно графику, приведенному на рис. 46.

20. Установление полного диаметра объектива. Полный диаметр линзы устанавливается в зависимости от способа крепления линз в оправе. Рекомендуется установить полный диаметр линзы по табл. 5, причем полученный из таблицы

Вычисление нулевого луча

Дано:  $r_1$   $d_1$   $n_1 = 1$   
 $r_2$   $d_2$   $n_2$   
 $r_3$   $n_3$   
 $n_4 = 1$  Примечание: предмет находится в бесконечности

	$\frac{\lg h_2}{\lg(n_3 - n_2)}$	$\frac{\lg h_3}{\lg(n_4 - n_3)}$	
	$\frac{\text{clg } r_2}{\lg N_2}$	$\frac{\text{clg } r_3}{\lg N_3}$	
$\frac{n_2 - n_1}{\gamma_2}$	$\frac{N_2}{\gamma_2}$	$\frac{N_3}{\gamma_3}$	
$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_4$	
$\frac{\lg \gamma_2}{\lg d_1}$	$\frac{\lg \gamma_3}{\lg d_2}$		
$\frac{\text{clg } n_2}{\lg N'_1}$	$\frac{\text{clg } n_3}{\lg N'_2}$	$\frac{\lg h_1}{\text{clg } \gamma_4}$	$f' =$
$-\frac{N'_1}{h_1 = r_1}$	$-\frac{N'_2}{h_2}$	$\frac{\lg h_3}{\text{clg } \gamma_4}$	$s' =$
$h_2$	$h_3$	$\frac{\lg s'}{\text{clg } \gamma_4}$	

Схема 4

Вычисление крайнего луча

Дано  $r_1$   $n_1 = 1$   
 $r_2$   $d_1$   $n_2$   
 $r_3$   $d_2$   $n_3$   
 $n_4 = 1$   $\alpha_1 = 0$ ;  $s_1 = -\infty$ ;  $h_1 =$

	$\frac{K_2}{q_1}$	$\frac{K_3}{q_2}$	$\frac{r_3}{-q_3}$	
	$q_2$	$q_3$	$\frac{s'_3}{-s'}$	
			$\delta s'$	
$\frac{\lg h_1 - \text{clg } r_1}{\lg \sin i_1}$	$\frac{\lg q_2}{\lg \sin \alpha_2}$	$\frac{\lg q_3}{\lg \sin \alpha_3}$		$K_2 = r_2 - r_1 + d_1$
$\frac{\lg(n_1 \cdot n_2)}{\lg \sin i'_1}$	$\frac{\lg(n_2 \cdot n_3)}{\lg \sin i'_2}$	$\frac{\lg(n_3 \cdot n_4)}{\lg \sin i'_3}$		$K_3 = r_3 - r_2 + d_2$
$\frac{\lg r_1}{\text{clg } \sin \alpha_2}$	$\frac{\lg r_2}{\text{clg } \sin \alpha_3}$	$\frac{\lg r_3}{\text{clg } \sin \alpha_4}$	$\frac{\lg h_1}{\text{clg } \sin \alpha_4}$	
$\lg q'_1$	$\lg q'_2$	$\lg q'_3$	$\lg f'_3$	
$-\frac{i_1}{i'_1}$	$-\frac{i_2}{i'_2}$	$-\frac{i_3}{i'_3}$		
$\alpha_2$	$\frac{\alpha_2}{\alpha_3}$	$\frac{\alpha_3}{\alpha_4}$	$\frac{f'_3}{-f'}$	
			$\delta f'$	



диаметр следует увеличить до ближайшего нормального диаметра по ГОСТу (от 3 до 13 мм через 0,5 мм, далее до 48 мм через 1 мм и от 50 до 102 мм через 2 мм, в том числе 55, 65, 85 и 95 мм). На диаметры линз устанавливаются допуски, на положительную  $L_4$ , а на отрицательную  $X_3$ , кроме особых случаев (например,  $C_3$ )

Таблица 5

Световой диаметр, мм	Полный диаметр	
	способ крепления в оправе	
	закаткой	кольцом
До 6 . . . . .	+0,6	не применяется
Свыше 6 до 10 . . . . .	+0,8	+1,0
Свыше 10 до 18 . . . . .	+1,0	+1,5
Свыше 18 до 30 . . . . .	+1,5	+2,0
Свыше 30 до 50 . . . . .	+2,0	+2,5
Свыше 50 до 80 . . . . .	+2,5	+3,0
Свыше 80 до 120 . . . . .	не применяется	+3,5
Свыше 120 . . . . .	не применяется	+4,5

Вычисление рекомендуется производить на арифмометре и с помощью шестизначных таблиц логарифмов.

## ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

## § 42. ИДЕАЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Реальная оптическая система дает изображение конечной величины при помощи достаточно широких пучков лучей. Попытки создать такую систему только на основе законов параксиальной области оказались бы неудачными, так как погрешности оптической системы, называемые аберрациями, вызвали бы нерезкость в изображении и нарушение подобия предмету. Знание же сущности и теории аберраций позволяет, пользуясь приемами вычислительной оптики, создавать реальные оптические системы, которые всеми своими оптическими свойствами соответствуют оптическим системам, созданным на базе законов параксиальной области.

Для осуществления оптической системы необходимо знание всех конструктивных элементов системы. К конструктивным элементам относятся: радиусы кривизны поверхностей, толщины оптических деталей, воздушные промежутки, диаметры оптических деталей и оптические постоянные стекол. Эти элементы становятся известными после окончания коррегирования системы на аберрации. Предварительное определение габаритов системы (диаметров и длин) в преобладающем числе случаев не требует аберрационного расчета. Определить фокусные расстояния компонентов системы, их расстояния друг от друга и диаметры световых отверстий становится возможным при помощи законов, выведенных для параксиальной области, стоит только предположить, что система идеальна в отношении аберраций.

Первоначально создают оптическую систему, дающую изображение заданной величины в виде комбинаций отдельных оптических узлов определенного диаметра, отстоящих друг от друга на некотором расстоянии. Затем приемами вычислительной оптики обосновываются значения радиусов кривизны поверхностей, толщин и оптических постоянных оптических деталей, удовлетворяющих требуемому качеству изображения.

Оптическая система, свободная от aberrаций, дающая изображение конечной величины при помощи широких пучков, называется *идеальной оптической системой*. Теория идеальной оптической системы основана на следующих положениях.

1 В пространстве предметов и в пространстве изображений существуют соответственные точки. Каждой точке в пространстве предметов соответствует одна и только одна точка в пространстве изображений.

2 В пространстве предметов и в пространстве изображений существуют соответственные линии. Каждой линии в пространстве предметов соответствует одна и только одна линия в пространстве изображений.

3 Если в пространстве предметов какая-нибудь точка лежит на прямой, то в пространстве изображения соответствующая ей точка также лежит на прямой, соответствующей прямой в пространстве предметов. Такие точки и прямые называются *сопряженными*.

Вместо точки можем представить себе источник света, или точку предмета, а вместо прямых — лучи, тогда получим гомоцентрический пучок в пространстве предметов, которому будет соответствовать ему сопряженный, гомоцентрический пучок в пространстве изображений.

### § 43 ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Для определения положения точки изображения необходимо из сопряженной точки предмета в оптическую систему направить два луча. В месте их пересечения по выходе из системы и будет располагаться точка изображения. Оптическая система располагается в однородной среде и показывается в виде главных плоскостей.

Для нахождения положения изображения применяют несколько приемов.

Прием первый. Из точки предмета вне оптической оси в оптическую систему направляют два луча. Первый луч направляется параллельно оптической оси. Этот луч по выходе из системы должен пройти через точку заднего фокуса. Второй луч направляется через точку переднего фокуса. По выходе из системы этот луч должен пойти параллельно оптической оси. Рис. 53 иллюстрирует построение изображения первым приемом. Предмет  $l$  расположен перед отрицательной (рассеивающей) линзой. Каждый луч входит в линзу на передней главной

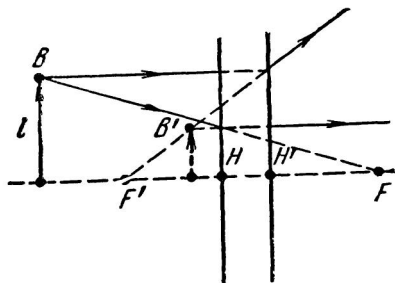


Рис. 53 Построение изображения. Предмет расположен перед оптической системой.

плоскости на определенной высоте и на такой же высоте выходит из задней главной плоскости, так как линейное увеличение в главных плоскостях равно единице. В пространстве изображений пересекаются только продолжения вышедших лучей. Из точки пересечения продолжений лучей опустим нормаль на оптическую ось, которая и будет мнимым уменьшенным изображением.

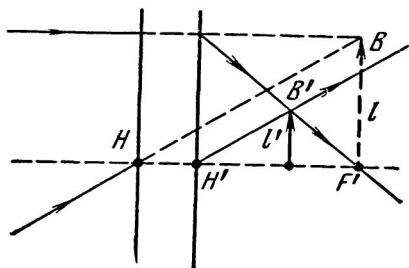


Рис 54 Построение изображения. Предмет расположен за оптической системой

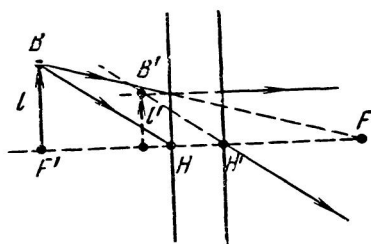


Рис 55 Построение изображения. Предмет расположен в заднем фокусе оптической системы

Прием второй. Из точки предмета вне оптической оси в систему также направляются два луча и один из них направляется параллельно оптической оси, а другой направляется в переднюю главную точку. Здесь используется свойство главных точек оптической системы, расположенной в однородной среде, образующих одинаковые углы луча с осью ( $\gamma = +1$ ).

Предмет расположен (рис. 54) за положительной оптической системой в точку  $B$  из пространства предметов (слева направо) направляются два луча — один из них идет параллельно оптической оси, а второй направляется через переднюю главную точку. Получили действительное и уменьшенное изображения.

Прием третий. Из точки предмета вне оптической оси в систему направляются два луча — один из них направляется в переднюю главную точку, а другой — в передний фокус. На рис 55 предмет  $l$  расположен в заднем фокусе отрицательной линзы. Лучи, вышедшие из точки  $B$ , после преломления в линзе образуют изображение  $l'$ . Изображение получилось мнимое и уменьшенное.

Примеры положения предмета и изображения для положительной и отрицательной тонких линз показаны на рис 56, 57.

#### § 44. ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ПОЛОЖЕНИЯМИ ПРЕДМЕТОВ И ИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Оптическая система (рис 58) представлена в виде системы главных плоскостей  $H$  и  $H'$ . Предмет  $l$ , расположенный в точке  $A$ , находится на расстоянии  $x$  от точки переднего фокуса. Изображение  $l'$  графически определяется пересечением в пространстве изображения двух лучей, один из которых выходит из точки  $B$  и идет

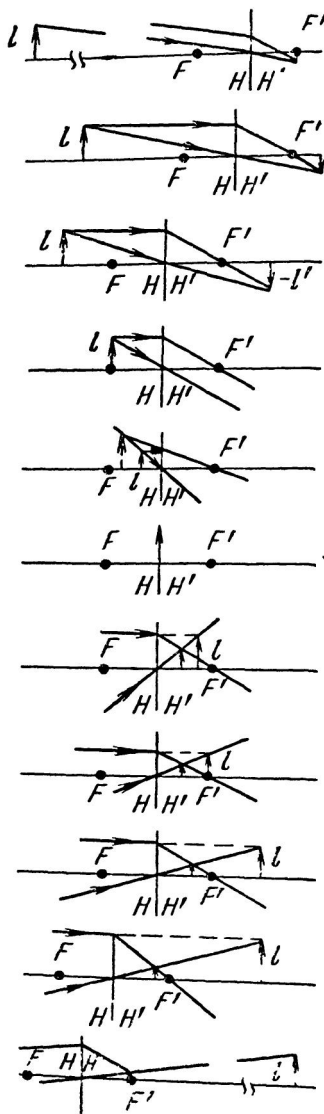


Рис. 56. Образование изображения положительной линзой

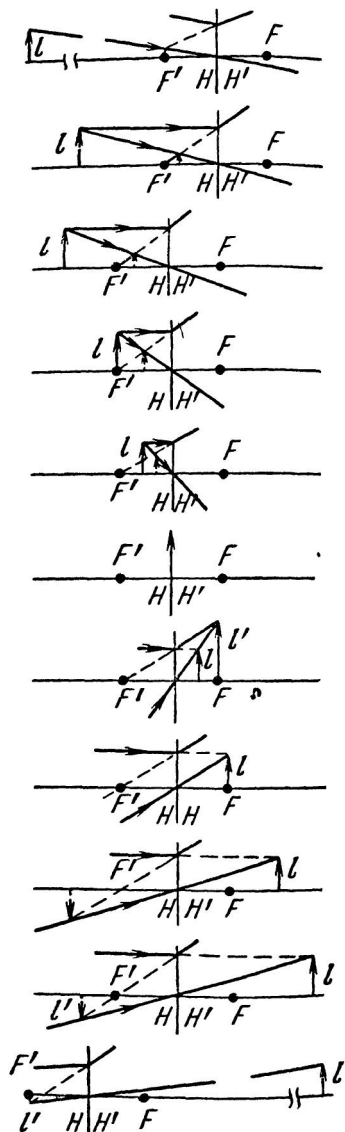


Рис. 57. Образование изображения отрицательной линзой

параллельно оптической оси, а другой направляется в точку переднего фокуса  $F$ . По выходе из системы первый луч должен пройти через точку заднего фокуса  $F'$ , а другой — параллельно оптической оси. Оба луча пересекаются в точке  $B'$  и образуют изображение  $l'$ .

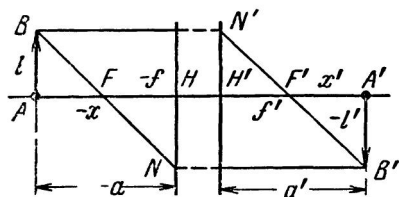


Рис 58 К выводу формулы Ньютона

Из подобия треугольников  $BAF$  и  $FHN$  следует

$$\frac{l'}{l} = -\frac{f}{x}. \quad (44,1)$$

Аналогично из подобия треугольников  $N'H'F'$  и  $F'A'B'$

$$\frac{l'}{l} = -\frac{x'}{f'}. \quad (44,2)$$

Отсюда получаем выражение, называемое *формулой Ньютона*:

$$xx' = ff'. \quad (44,3)$$

Если оптическая система находится в однородной среде, то  $-f=f'$  и вместо уравнения (44,3) имеем

$$xx' = -f'^2. \quad (44,4)$$

Из выражений (44,1) и (44,2) получаем формулы линейного увеличения идеальной оптической системы

$$\beta = -\frac{f}{x}, \quad (44,5)$$

$$\beta = -\frac{x'}{f'}. \quad (44,6)$$

Согласно рис. 58, имеем  $x=a-f$  и  $x'=a'-f'$ . Подставляя эти выражения в формулу (44,3) и раскрывая скобки, получим

$$\frac{f'}{a'} + \frac{f}{a} = 1. \quad (44,7)$$

Кроме того, учитывая (15,2),

$$\beta = \frac{n_1 a'}{n_{\text{пос}} \cdot a}. \quad (44,8)$$

Если система находится в однородной среде, то выражение (44,7) принимает вид формулы, известной под названием *формулы отрезков*:

$$-\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f'}, \quad (44,9)$$

а из (44,8) получим

$$\beta = \frac{a'}{a}. \quad (44,10)$$

Подставив выражение (44,10) в (44,9), получим

$$a = \frac{(1-\beta)f'}{\beta}, \quad (44,11)$$

$$a' = (1-\beta)i'. \quad (44,12)$$

Формулы (44,9—44,12) справедливы при  $-f=f'$ .

**Пример 20.** Определить необходимое фокусное расстояние проекционного объектива, с помощью которого необходимо передать изображение с экрана осциллоскопа на обычный экран с 5-кратным увеличением, если расстояние между экранами 3 м.

**Решение.** Дано:  $\beta = -5$ ,  $-a + a' = 3000$  мм.

Подставим эти данные в формулу отрезков (44,9) и учтем (44,10):

$$a = \frac{-a + a'}{\beta - 1} = -500 \text{ мм}$$

и, следовательно,  $a' = 2500$  мм.

Затем из формулы (44,12) окончательно получим:

$$f' = \frac{a'}{1 - \beta} = 417 \text{ мм.}$$

На практике  $f'$  объектива подбирают ближайшим к вычисленному. Так, например, если  $f' = 300$  мм, то по формуле (44,11)  $a = -360$  мм, а по формуле (44,12)  $a' = 1800$  мм, следовательно, расстояние между осциллоскопом и экраном 2160 мм.

## § 45. ПРОДОЛЬНОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ

Оптическая система (рис. 59) представлена в виде главных точек  $H$  и  $H'$ .

Ее оптическая ось  $A_1A_2'$ . Перед системой в точке  $A_1$  расположен предмет, а в точке  $A_1'$  его изображение. Если предмет передвинется в сторону системы на расстояние  $\Delta x$  и окажется в точке  $A_2$ , его изображение переместится в точку  $A_2'$  на расстояние  $\Delta x'$  от точки  $A_1'$ . Точки  $A_1$  и  $A_1'$ , а также  $A_2$  и  $A_2'$  являются точками сопряженными. Найдем отношение  $\Delta x'$  к  $\Delta x$ . Предел отношения  $\Delta x'$  к  $\Delta x$ , когда  $\Delta x$  стремится к нулю, называется *продольным увеличением* в данной паре сопряженных точек

$$\alpha = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta x'}{\Delta x} \right) = \lim_{(x_2 - x_1) \rightarrow 0} \left( \frac{x_2' - x_1'}{x_2 - x_1} \right) = \frac{dx'}{dx}.$$

Дифференцируя  $xx' = ff'$  по  $x$  и  $x'$ , получим

$$x dx' + x' dx = 0,$$

или

$$\alpha = \frac{dx'}{dx} = -\frac{x'}{x}. \quad (45,1)$$

Из (44,5) и (44,6) выделим  $x$  и  $x'$  и подставим их в формулу (45,1)

$$\alpha = -\frac{f'}{f} \beta^2. \quad (45,2)$$

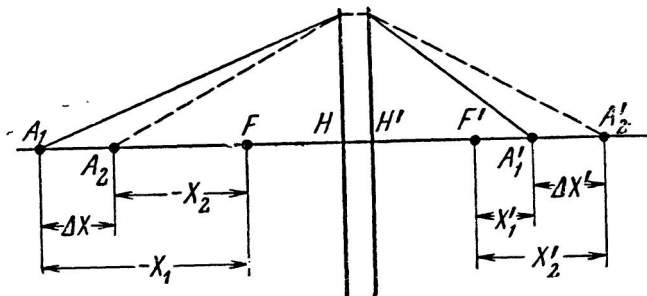


Рис. 59. К выводу формулы продольного увеличения

Заменим отношение фокусных расстояний по формуле (13,13)

$$\alpha = \frac{n'}{n} \beta^2. \quad (45,3)$$

Отсюда следует, что продольное увеличение пропорционально квадрату линейного.

Ранее была получена формула (15,2), устанавливающая связь между линейным и угловым увеличением.

Найдем из этой формулы отношение показателей преломления и подставим в формулу (45,3). Тогда окончательно получим связь между продольным, линейным и угловым увеличением

$$\alpha\gamma = \beta. \quad (45,4)$$

**Пример 21.** Конденсор проектирует световое тело источника света на щель спектрального прибора с 3-кратным увеличением. Определить необходимое смещение щели, если источник света передвинулся на расстояние 1 мм.

**Решение.** Дано  $\beta = -3$ ;  $dx = 1$  мм.

Применяя формулы (45,1) и (45,3), при  $n = n'$ , получим

$$dx' = \beta^2 dx = 9 \text{ мм.}$$

## § 46. ТОНКАЯ ЛИНЗА И СИСТЕМА ТОНКИХ ЛИНЗ

Если в реальной толстой линзе толщина мала по сравнению с радиусами кривизны преломляющих поверхностей, то такая линза называется *тонкой*. Главные плоскости тонкой линзы совпадают.



Представим себе систему из трех тонких линз с главными точками  $H_1, H_2$  и  $H_3$  (рис. 60), расположенными друг от друга на расстояниях  $d_1$  и  $d_2$ .

Направим в систему луч под углом  $\alpha=0$ . По известному правилу графического определения положения главных плоскостей найдем положение эквивалентной задней главной плоскости  $H_3'$ . Рас-

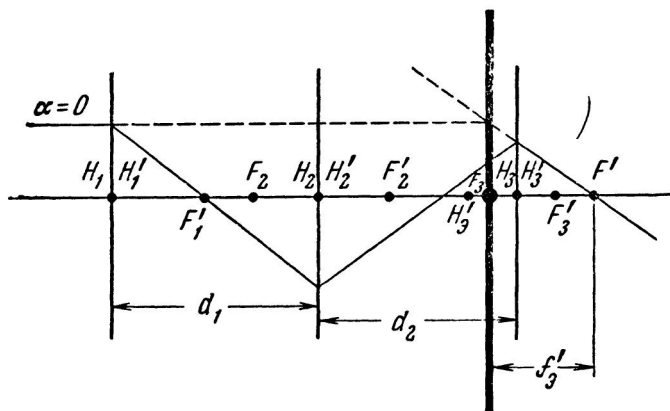


Рис. 60. Система тонких линз

стояние  $H_3'F' = f_3'$  равно эквивалентному заднему главному фокусному расстоянию сложной системы из трех тонких линз.

Все сложные оптические системы, а в практике главным образом с ними и приходится встречаться, можно представить в виде систем тонких линз. Рассмотрим основные признаки таких систем. Все реальные оптические системы классифицированы по признакам положения предмета и изображения.

1. Предмет расположен в бесконечности ( $-\infty$ ), а изображение находится на конечном расстоянии. Примером такой системы является фотографический объектив (рис. 61, а). К этим системам относятся любые сложные оптические приборы, предназначенные для наблюдения или фотографирования бесконечно удаленных предметов, при условии, что в пространстве изображений изображение располагается на конечном расстоянии от системы. Это изображение или фотографируется с помощью светочувствительного материала, или непосредственно рассматривается на матовой поверхности наблюдателем, или передается по электронно-оптическому тракту, если предварительно образовано на фотокатоде ЭОПа или телевизионной передающей трубки. Такие системы будем называть *фотографическими*.

2. Предмет расположен в бесконечности ( $-\infty$ ). Изображение находится также в бесконечности

( $+\infty$ ). Примером такой системы является зрительная труба (рис. 61, а). К этим системам относятся любые сложные оптические приборы, предназначенные для визуального наблюдения бесконечно удаленных предметов. К их числу относится большая группа военных и геодезических наблюдательных приборов: бинокли, стереотрубы, прицелы, дальномеры, перископы, нивелиры, тео-

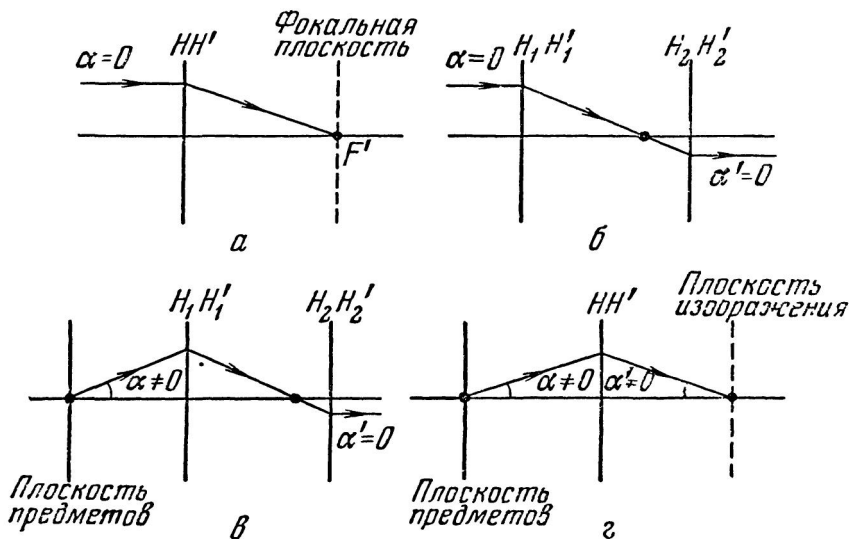


Рис. 61. Типы оптических систем: а — фотографический объектив; б — телескопическая система; в — система микроскопа; г — проекционная и репродукционная система

долиты и др. Системы подобного рода называются *телескопическими*, или *афокальными*.

3. Предмет расположен на конечном расстоянии, а изображение — в бесконечности ( $+\infty$ ). Примером такой системы является микроскоп (рис. 61, в). К этим системам относятся любые сложные оптические приборы, предназначенные для визуального наблюдения близко расположенных предметов. К их числу относится большая группа различных микроскопов: отсчетных, биологических, поляризационных, а также фотограмметрические приборы: стереометры, компараторы, стереопланиграфы. Такие системы называются системами *микроскопа*.

4. Предмет расположен на конечном расстоянии и изображение также находится на конечном расстоянии. Примерами такой системы являются проекционный объектив и фоторепродукционный объектив (рис. 61, г). К этим системам относятся любые сложные оптические приборы, предназначенные для наблюдения или фотографирования предметов, расположенных на конечном расстоянии, при условии, что в пространстве изображений изображение располагается на конечном

расстоянии от системы. Это изображение или фотографируется на светочувствительном материале, или рассматривается на экране. Экраном может быть и матовое стекло.

В зависимости от характера приема изображения такие системы называются *проекционными*, или *репродукционными*. К числу проекционных систем относятся все виды кинопроекционных аппаратов, диаскопы, эпископы, эпидиаскопы, проекционные аппараты для контроля деталей в машиностроении и др. К числу репродукционных систем относятся фотографические репродукционные аппараты, ультрафоты, фотоувеличители и др.

К этим четырем группам можно свести все разнообразие оптических приборов. Есть приборы, которые имеют устройства ряда таких групп. Эти четыре группы приборов имеют свои отличительные свойства, теорию и особенности. Осветительные устройства всех этих систем не влияют на их классификацию.

### § 47. ОПТИЧЕСКАЯ СИЛА СИСТЕМЫ

Фокусное расстояние оптической системы или его обратная величина являются мерой оптического действия системы. Из уравнения (13,13) следует

$$-\frac{n}{f} = \frac{n'}{f'}. \quad " \quad \vartheta$$

Эти отношения определяют *оптическую силу системы*.

Оптическое действие системы проявляется двояко.

Во-первых, чем больше оптическая сила, тем ближе к системе расположено изображение, во-вторых, чем больше оптическая сила, тем меньше величина изображения.

Большей частью оптическую систему рассматривают в воздухе, тогда  $n=n'=1$ , и за оптическую силу системы линз принимают величину, обратную заднему фокусному расстоянию:

$$\Phi = \frac{1}{f'}. \quad (47,1)$$

Единицей оптической силы является диоптрия. Одна диоптрия есть оптическая сила системы (линзы) в воздухе с фокусным расстоянием, равным одному метру.

Выразив фокусное расстояние в миллиметрах, получим

$$\Phi = \frac{1000}{f'}. \quad (47,2)$$

Например, линза с фокусным расстоянием 50 мм имеет оптическую силу в 20 *дптр* (диоптрий).

Обычно не принято сложные оптические системы или объективы и окуляры в приборах характеризовать оптической силой в диоптриях. Характеристика линз в диоптриях принята в очковой

оптике. Очковые линзы находят себе применение и в оптических приборах и в исследованиях различного рода. В этом случае линзы получают наименование диоптрийных.

### § 48. ФОРМУЛА УГЛОВ

Точка  $A$  расположена на оптической оси системы с главными плоскостями  $HH'$  (рис. 62). Ее изображением является точка  $A'$ .

Установим зависимость между углами  $\alpha$  и  $\alpha'$ .

Из рис. 62 следует

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{a} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \alpha' = \frac{h}{a'}$$

Из этих выражений найдем  $a$  и  $a'$  и подставим в формулу (44,7). Получим

$$\frac{f \operatorname{tg} \alpha}{h} + \frac{f' \operatorname{tg} \alpha'}{n} = 1.$$

Рис 62 К выводу формулы углов тонкой системы

Разделив все члены последнего уравнения на  $f'$  и подставив формулу (47,1), получим

$$\operatorname{tg} \alpha' = -\frac{f}{f'} \operatorname{tg} \alpha + h \Phi,$$

или в общем случае

$$\operatorname{tg} \alpha_{k+1} = -\frac{f_k}{f'_k} \operatorname{tg} \alpha_k + h_k \Phi_k. \quad (48,1)$$

В этом выражении отношение фокусных расстояний заменим, воспользовавшись уравнением (13,13), отношением показателей преломления

$$\operatorname{tg} \alpha_{k+1} = \frac{n_k}{n_{k+1}} \operatorname{tg} \alpha_k + h_k \Phi_k. \quad (48,2)$$

Если оптическая система находится в однородной среде, например в воздухе, то  $n_k = n_{k+1}$  и формула (48,2) принимает общеизвестный вид

$$\operatorname{tg} \alpha_{k+1} = \operatorname{tg} \alpha_k + h_k \Phi_k. \quad (48,3)$$

Величина  $h_k$  определяется по формуле (13,19), т. е.

$$h_{k+1} = h_k - \operatorname{tg} \alpha_{k+1} d_k. \quad (48,4)$$

### § 49. ОПТИЧЕСКАЯ СИЛА ДВУХ СИСТЕМ

Две системы с оптическими силами  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  расположены на одной оптической оси  $OO'$  на расстоянии  $d$  друг от друга (рис. 63).

Общее фокусное расстояние обеих систем  $f'$  называется *эквивалентным фокусным расстоянием*.

В соответствии с формулой (12,1) имеем

$$\Phi = \frac{1}{f'} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_3}{h_1}. \quad (49,1)$$

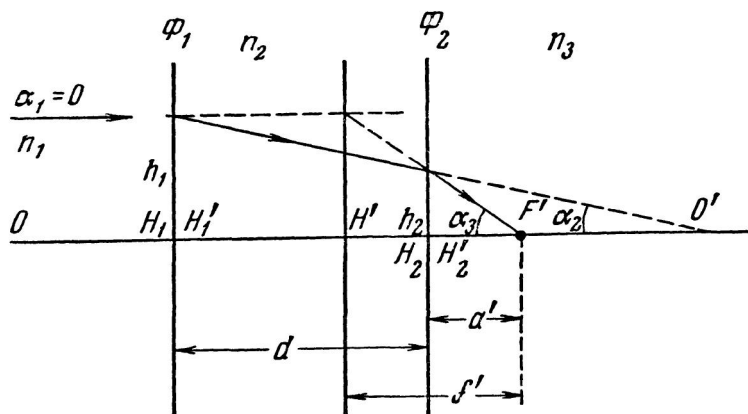


Рис. 63. К выводу формулы оптической силы двух систем

Так как  $\alpha_1=0$ , то, применяя формулу углов (48,2) и формулу высот (48,4), будем иметь

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = h_1 \Phi_1$$

и

$$h_2 = h_1 - \operatorname{tg} \alpha_2 d = h_1 (1 - \Phi_1 d) \quad (49,2)$$

и далее с учетом  $n_3 = 1$ ,

$$\operatorname{tg} \alpha_3 = \frac{n_2}{n_3} \operatorname{tg} \alpha_2 + h_2 \Phi_2 = n_2 h_1 \Phi_1 + h_1 (1 - \Phi_1 d) \Phi_2. \quad (49,3)$$

Подставив последнее выражение в уравнение (49,1), получим основное уравнение

$$\Phi = n_2 \Phi_1 + \Phi_2 - d \Phi_1 \Phi_2. \quad (49,4)$$

Если каждая оптическая система находится в однородной среде, то

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - d \Phi_1 \Phi_2. \quad (49,5)$$

Расстояние от системы до точки заднего фокуса найдем по формуле

$$a' = \frac{h_2}{\operatorname{tg} \alpha_3}.$$

Подставив в последнюю формулу выражения (49,2) и (49,3), получим

$$\alpha' = \frac{1 - \Phi_1 d}{\Phi}. \quad (49,6)$$

**Пример 22.** Определить воздушный промежуток между двумя линзами с фокусными расстояниями 40 мм, если необходимо получить эквивалентное фокусное расстояние системы из этих двух линз в 25 мм. Дано:  $f' = 25$  мм;  $f_1' = f_2' = 40$  мм.

**Решение.** Из формулы (47,1) получим

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \frac{1}{f_1'} = 0,025 \quad \text{и} \quad \Phi = \frac{1}{f'} = 0,04.$$

Из выражения (49,5) следует

$$d = \frac{\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi}{\Phi_1 \Phi_2} = 16 \text{ мм.}$$

## § 50. НАКЛОННЫЕ ПЛОСКОСТИ ПРЕДМЕТОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

Бесконечно тонкая оптическая система с оптической осью  $PP'$  представлена в виде двух слившихся вместе главных плоскостей  $H$  и  $H'$  (рис. 64).

Плоскость предметов  $AB$  наклонена к главной плоскости на угол  $\varphi_p$ , а плоскость изображений  $A'B'$  — к главной плоскости на угол  $\varphi_t$ . Требуется доказать, что  $A'B'$  есть изображение  $AB$ .

Наклонная плоскость предметов отстоит от системы по оптической оси на расстоянии  $OP = -a$ , а плоскость  $A'B'$  — на расстоянии  $OP' = a'$ . Точки  $P$  и  $P'$  являются точками сопряженными. Из точки  $A$  направим в оптическую систему два луча, один через

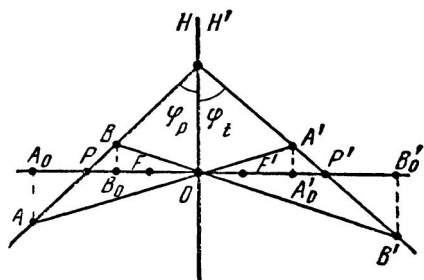


Рис. 64. Плоскость предметов наклонена к оптической оси

главную точку  $O$ , который пройдет через систему без преломления в направлении  $OA'$ , а второй — через точку  $P$  по направлению  $AN$ . Последний луч после преломления пойдет по направлению  $NP'$ . Оба эти луча пересекаются в точке  $A'$ , следовательно, точки  $A$  и  $A'$  есть точки сопряженные. Аналогично найдем и изображение точки  $B$ . Точки  $B$  и  $B'$  также оказываются сопряженными. Значит и весь отрезок  $A'B'$  сопряжен отрезку  $AB$ . Отсюда следует, что обе сопряженные плоскости предметов и изображений всегда пересекают главные плоскости объектива в направлении  $N$ , перпендикулярном чертежу. Как видно из рис. 64, существует зависимость

$$\operatorname{ctg} \varphi_t = -\frac{a \operatorname{ctg} \varphi_p}{a'}, \quad (50,1)$$

или

$$\operatorname{ctg} \varphi_p = -\beta \operatorname{ctg} \varphi_t. \quad (50,2)$$

Если ординатой точки  $B$  является  $\overline{PB} = y$ , то ординатой точки изображения  $B'$  служит отрезок  $\overline{B'A'} = y'$ , величина которого определяется выражением

$$y' = \frac{a' y \cos \varphi_p}{\cos \varphi_t (a + y \sin \varphi_p + y \cos \varphi_p \operatorname{tg} \varphi_t)}, \quad (50,3)$$

а абсцисса  $x'$  точки изображения в плоскости, совпадающей с плоскостью изображения, при условии, что абсциссой предмета в плоскости предмета (в плоскости рисунка  $x=0$  и  $x'=0$ ) является  $x$ , находится по формуле

$$x' = \frac{y' x \cos \alpha_t}{y \cos \varphi_p}. \quad (50,4)$$

Из рис. 64 следует, что в пределах плоскости изображения  $A'B'$  существуют различные линейные увеличения, наибольшее по направлению  $B'$ , и наименьшее по направлению  $A'$ , перпендикулярные плоскости чертежа.

Обозначив  $OA_0 = -a_1$  и  $OB_0 = -a_2$ , а также  $OA_0' = a_1'$  и  $OB_0' = a_2'$ , запишем

$$\beta_{\text{мин}} = \frac{a_1'}{a_1}, \quad (50,5)$$

$$\beta_{\text{макс}} = \frac{a_2'}{a_2}. \quad (50,6)$$

Зная величину предмета  $AB$  (или  $PB$ ) и угол наклона плоскости предметов  $\varphi_p$ , нетрудно определить  $a_1$  и  $a_2$ , а затем по формуле (44,8) найти  $a_1'$  и  $a_2'$ .

Наклонные плоскости предмета и изображения встречаются в фототрансформаторах, применяемых с целью исправления перспективных искажений на фотографических снимках, возникающих из-за наклона фотокамеры в момент фотографирования. Применяются фототрансформаторы и для аффинных преобразований оптических изображений.

## § 51. АНАМОРФОЗНЫЕ СИСТЕМЫ

Оптические системы круговой симметрии позволяют получать изображения, пропорциональные по величине фокусному расстоянию или линейному увеличению в пределах всей площади изображения. С подобными оптическими системами в виде линз, объек-

тивов и окуляров и приходится чаще всего встречаться в обычных оптических приборах. Однако практика потребовала получать изображения непропорциональные в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Достаточно привести пример с проблемой освещения щели любого спектрального прибора. Щель обычно имеет

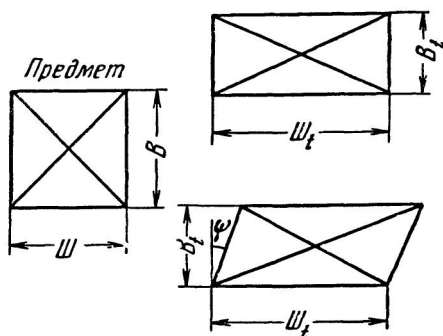


Рис 65 Виды трансформированных изображений

весьма малую ширину (сотые доли миллиметра) и относительно большую длину (несколько миллиметров). Проектирование на эту щель изображения светового тела источника света обычными средствами приводит к большим потерям световой энергии, так как световое тело имеет толщину, значительно превосходящую ширину щели, а длина светового тела меньше щели. В результате большая часть изображения светового тела ложится на непрозрачную часть щели и не используется.

Применением оптических систем с цилиндрическими линзами или особых приемов с обычными системами круговой симметрии удастся получать разномасштабные изображения в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Процесс подобного непропорционального репродуцирования оптического изображения называется *трансформированием*, а оптические системы, позволяющие получать масштаб изображения, различный в двух взаимно перпендикулярных направлениях, называются *анаморфозными*.

Трансформирование изображения обычно производят по высоте и ширине. Обозначим отношение высоты трансформированного изображения  $B_t$  к высоте самого предмета  $B$  через  $K_B$  — *коэффициент высоты*

$$K_B = \frac{B_t}{B}, \quad (51,1)$$

а отношение ширины трансформированного изображения  $\text{Ш}_t$  к ширине самого предмета  $\text{Ш}$  через  $K_{\text{Ш}}$  — *коэффициент ширины* (рис. 65).

$$K_{\text{Ш}} = \frac{\text{Ш}_t}{\text{Ш}}. \quad (51,2)$$

Отношение коэффициента ширины к коэффициенту высоты назовем *коэффициентом анаморфирования* (коэффициент трансформирования)

$$A = \frac{K_{\text{Ш}}}{K_B}. \quad (51,3)$$



Наклонное (ромбовидное) изображение также является одним из видов трансформированного. Наклон изображения характеризуется угловым отклонением  $\psi$  средней осевой вертикальной линии предмета

Известно много методов для получения трансформированного изображения. На рис 66 схематически показаны различные мето-

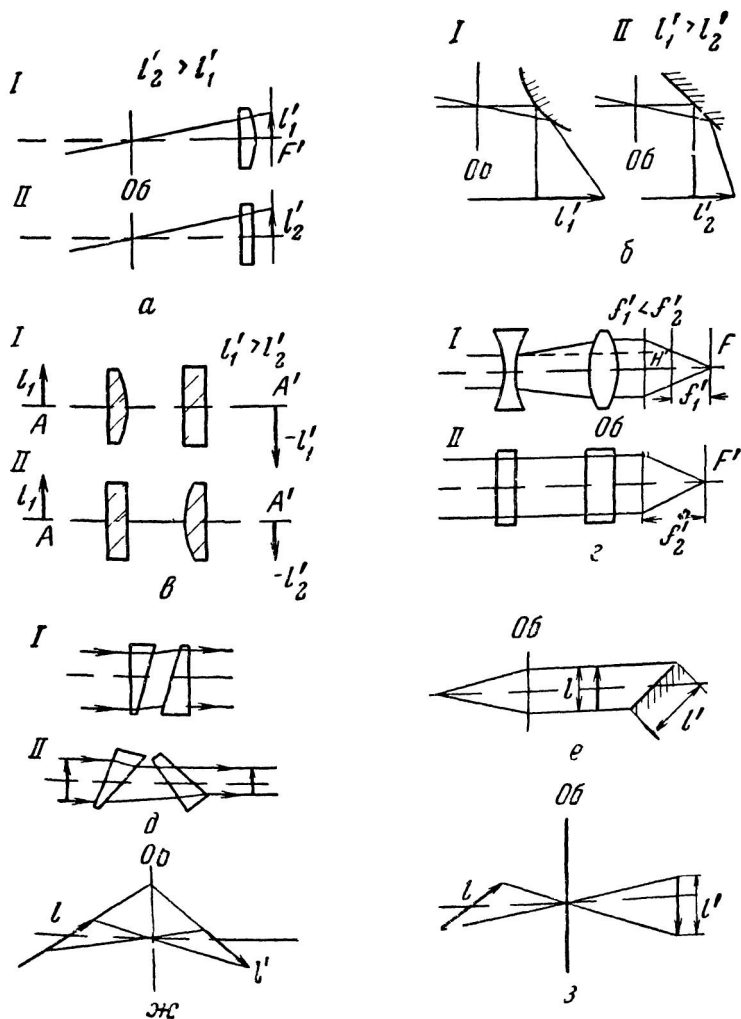


Рис 66 Получение трансформированных изображений а — метод преломляющей цилиндрической поверхности, б — метод отражающей цилиндрической поверхности, в — метод цилиндрического объектива-анаморфота, г — метод цилиндрической афокальной насадки, д — призмный метод, е — теневой метод, ж — оптический метод (двухэтапный), з — ракурсный метод (двухэтапный)

ды, нашедшие себе применение в практике трансформирования оптического изображения.

Если перед плоскостью предметов или плоскостью изображений (рис. 66, *a*) поместить цилиндрическую линзу, то действие цилиндрической линзы в двух взаимно перпендикулярных направлениях будет не одинаковым. В одном из них (*I*) как бы действует обычная линза, а в другом (*II*) плоскопараллельная пластина, в результате изображения  $l_1'$  и  $l_2'$  оказываются неодинаковыми при одинаковых  $l_1$  и  $l_2$ , не показанных на рисунке. Изображения  $l_1'$  и  $l_2'$  оказываются, строго говоря, не в одной плоскости, но достаточно резкими для практического использования, так как смещение плоскостей изображения относительно друг друга мало, а пучки лучей достаточно узкие.

Аналогичное действие возникает и при применении отражающей цилиндрической поверхности (рис. 66, *b*).

Если объектив, проектирующий предмет  $l_1$  (рис. 66, *в*), составить надлежащим образом из двух цилиндрических линз, то в плоскости изображения  $A'$  изображения  $l_1'$  и  $l_2'$  будут по величине различными. Первая линза в направлении *I* действует как обычная сферическая линза, а в направлении *II* она действует как плоскопараллельная пластина; в перпендикулярном направлении *II* вторая линза действует как обычная сферическая линза, а в направлении *I* — как плоскопараллельная пластина. Цилиндрический объектив применяется при звуковоспроизведении с киноплёнки.

Афокальные цилиндрические приставки (рис. 66, *г*) по системе Кретьена нашли себе применение в широкоэкранный кинематографе как для съёмки кинофильмов, так и для проекции: они состоят из двух цилиндрических линзовых компонентов, первого — отрицательного и второго — положительного. В направлении *I* они составляют телескопическую систему, а в направлении *II* действуют как плоскопараллельные пластины.

Если фокусное расстояние первого компонента приставки  $f_{I'}$ , а второго —  $f_{II'}$ , то коэффициент анаморфозы приставки определится выражением

$$A = - \frac{f_{I'}}{f_{II'}}. \quad (51,4)$$

Афокальная цилиндрическая система приставляется к обычному киносъёмочному объективу и укорачивает его фокусное расстояние, а во взаимно перпендикулярном направлении она не изменяет фокусного расстояния объектива. Таким образом, при съёмке  $f_1'$  в направлении *I* меньше  $f_2'$  в направлении *II* и

$$f_1' = f_2' A. \quad (51,5)$$

В кинематографии большей частью применяют при съёмке  $A=0,5$ . При проекции аналогичная, но другая система пристав-

ляется к обычному кинопроеекционному объективу, положительным компонентом к объективу; тогда при проекции  $A=2$ , а в результате на экране масштаб изображения в двух взаимно перпендикулярных направлениях будет одинаковым. При киносъемке происходит сжатие изображения по горизонтали, а при проекции — расширение. Тем самым удастся на обычной нормальной 35-миллиметровой киноплёнке разместить изображение, которое в обычных условиях потребовало бы 70-миллиметровой киноплёнки.

Клин (см. рис. 16) позволяет получать трансформированное изображение, но один клин изменяет направление пучка, а его трансформирующее действие невелико. Применение двух клиньев (рис. 66, *д*) дает возможность сохранить параллельными входящий и выходящий световые пучки лучей и усилить трансформирующее действие. Подобного рода клиновые системы нашли применение и как системы для проекции, вместо цилиндрических афокальных приставок, и как основная часть фотографического репродукционного объектива.

Обычные оптические системы круговой симметрии также позволяют получать трансформированные изображения. Простейшим способом является трансформирование в параллельном пучке лучей (рис. 66, *е*). Если на пути параллельного пучка, полученного с помощью любого объектива, поставить полупрозрачный негатив, то на экране получится трансформированное теневое изображение, пропорциональное косинусу угла наклона экрана.

Наклонные плоскости предмета и изображения (рис. 66, *ж*) позволяют получить изображение квадратного предмета в виде трапеции. Если полученное трапециевидное изображение снова установить на наклонную плоскость предметов и децентрировать его, то на наклонной плоскости изображения можно получить изображение в виде прямоугольника. Подобный метод, позволяющий получать на обоих этапах съемки резкие изображения, назван *оптическим*.

Расположение на каждом из этапов съемки плоскости изображения, перпендикулярной оптической оси, так же, как и в оптическом методе, позволяет получать трансформированные правильные изображения. На этой плоскости (рис. 66, *з*) располагается не само изображение, а его ракурс, в связи с чем метод и получил наименование *ракурсного*. Применение узких пучков лучей и небольшого по высоте поля зрения позволило получать практически годные изображения, поэтому этот метод нашел себе применение в полиграфии, картографии и фотографии.

---

## Глава VII

### ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПРИБОРОВ

#### § 52. ГЛАЗ

Глаз является природным оптическим инструментом и имеет сложное устройство (рис. 67). Снаружи глаз покрыт твердой белковой оболочкой — *склерой* толщиной 0,4—1,1 мм. Передняя часть склеры прозрачна, несколько изогнута, она называется *роговицей*. Ее наружный покров переходит в *конъюнктиву*, прикрепленную к векам. За роговой оболочкой спереди располагается *передняя камера*. Она заполнена водянистой влагой. Под склерой расположена *сосудистая оболочка*, представляющая собой систему кровеносных сосудов, питающих глаз. Спереди сосудистая оболочка переходит в *радужную оболочку*. Радужная оболочка посередине имеет отверстие, выполняющее роль действительной диафрагмы (зрачок глаза). За радужной оболочкой располагается *хрусталик*. Форма хрусталика под воздействием мышц изменяется, а тем самым изменяется оптическая сила глаза. За хрусталиком расположена *задняя камера*, наполненная водянистой влагой. К сосудистой оболочке, заполняющей внутреннюю полость склеры, прилегает пигментный слой, за которым располагается сетчатая оболочка, или *ретины*. Ретина имеет сложное устройство из 10 слоев. В ней расположены чувствительные к свету элементы, имеющие вид *палочек* и *колбочек*. Длина палочки около 0,06 мм, а колбочки — 0,035 мм. Внутренние членики палочки имеют размер около 0,002 мм, а колбочки — 0,0065 мм. Число палочек составляет около  $13 \cdot 10^7$ , а колбочек — около  $7 \cdot 10^6$ . В середине сетчатки, в области, прилегающей к месту вхождения зрительного нерва в глазное яблоко, располагается больше колбочек, а в боковых частях — больше палочек. В месте входа зрительного нерва нет этих элементов, поэтому оно называется *слепым пятном*. Диаметр его около 1,8 мм. Над слепым пятном находится *желтое пятно*, заполненное преимущественно колбочками. В центре желтого пятна имеется углубление

диаметром около 0,4 мм, в котором располагаются только колбочки. Это место наиболее ясного видения. Центр его не совпадает со следом оптической оси на сетчатке, т. е. с точкой заднего фокуса. Таким образом, и линия, называемая *зрительной осью*, по которой происходит наблюдение рассматриваемого предмета, не

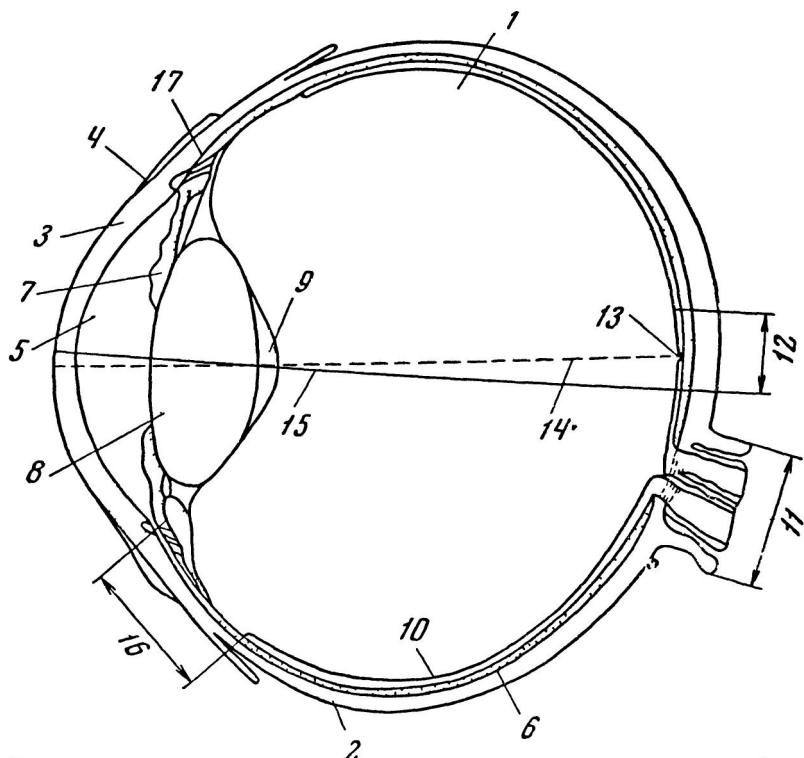


Рис. 67. Разрез глаза человека. 1 — стекловидное тело; 2 — склера; 3 — роговица; 4 — конъюнктивa; 5 — передняя камера; 6 — сосудистая оболочка; 7 — радужная оболочка; 8 — хрусталик; 9 — захрусталиковое пространство; 10 — ретина; 11 — зрительный нерв; 12 — желтое пятно; 13 — центральная ямка; 14 — зрительная ось; 15 — оптическая ось; 16 — ресничное тело; 17 — ресничная мышца

совпадает с оптической осью, а составляет с ней так называемый *угол альфа*, примерно равный  $5^\circ$ . При наблюдении тех или иных предметов глаз человека своей зрительной осью как бы ощупывает все контуры, последовательно приводя их в область желтого пятна.

Существуют различные гипотезы, объясняющие сущность зрения. Большинство исследователей признает, что зрительные ощущения связаны с изменением зрительного пурпура, находящегося в наружных члениках палочек и колбочек, который под действием света разлагается и обесцвечивается.

Зрительный пурпур выцветает на тех частях сетчатки, на которые упал свет, вызывающий фотохимическую и термическую реакции. Зрительный пурпур восстанавливается в темноте. Глаз предохраняется от ослепления ярким светом пигментными зернами, выделяющимися из пигментного слоя.

Основными свойствами глаза являются: 1) аккомодация, 2) адаптация, 3) световая чувствительность, 4) спектральная чувствительность, 5) острота зрения, 6) поле зрения, 7) бинокулярное зрение, 8) стереоскопическое зрение.

*Аккомодацией* называется способность глаза приспособливаться к четкому наблюдению разноудаленных предметов. Она достигается изменением формы хрусталика. При максимальном напряжении аккомодации оптическая сила глаза увеличивается с 58,64 диоптрии до 70,57.

Различают *ближнюю точку ясного зрения*, соответствующую максимальному напряжению, и *дальнюю точку ясного зрения*, соответствующую полному покою аккомодации. Расстояние между этими точками в метрах определяет область, или *длину аккомодации*, а выраженное в диоптриях — *силу аккомодации*. Сила аккомодации изменяется с возрастом, так, например, в возрасте 20 лет она составляет 10 диоптрий, а в 50 — 2,5 диоптрии. За расстояние наилучшего зрения принимают 250 мм.

*Адаптацией* называется способность глаза приспособливаться к различным условиям освещенности. Различают *световую* и *темновую адаптацию* глаза.

Понижение чувствительности глаза при световом раздражении называется световой адаптацией. При переходе из темного помещения в светлое глаз ощущает чувство ослепления, проходящее через некоторое время. При ярком освещении зрительный пурпур, покрывающий палочки, полностью разлагается и палочки не действуют. Изображения воспринимают колбочки, которых от яркого света защищают пигментные зерна. Одновременно сужается зрачок глаза (с 9 до 2 мм). Для полной адаптации необходимо время 20—30 мин.

Темновой адаптацией называется повышение чувствительности глаза при световом раздражении. Известно, что при переходе из светлого помещения в темное глаза сначала ничего не видят или плохо видят, но спустя некоторое время они начинают различать предметы. При слабом освещении колбочки не действуют. В палочках образуется зрительный пурпур, разложение которого небольшими дозами света вызывает ощущение света. Для темновой адаптации необходимо время около часа, но, однако, спустя 5—7 мин пребывания в темноте зрение восстанавливается достаточно.

*Световая чувствительность* характеризуется наименьшим количеством световой энергии, могущей вызвать световое раздражение — *темновым порогом раздражения*. Темновой порог раздражения иногда называют *абсолютным порогом зрения*. Минимальная

яркость, вызывающая зрительное ощущение, называется *пороговой яркостью*, а величина, обратная пороговой яркости, и есть световая чувствительность. Для получения светового раздражения необходимо иметь освещенность на зрачке глаза в  $5 \cdot 10^{-9} \div 8 \cdot 10^{-9}$  лк, при этом зрачок глаза раскрыт до диаметра  $7 \div 8$  мм.

Обычно глаз воспринимает цвета в диапазоне длин волн  $380—770$  нм. Такой способностью обладают колбочки, поэтому при сумеречном зрении, при котором действуют палочки, все кажется бесцветным. Различные цвета воспринимаются с различной интенсивностью. Для дневного зрения максимум *спектральной чувствительности* имеет место для длины волны  $564$  нм, однако для практических расчетов его принято принимать для длины волны  $555$  нм. Чувствительность глаза к лучам спектра с различной длиной волны определяется *кривой относительной видности*  $K_{\lambda}$ .

*Остротой зрения*, или разрешающей силой глаза, называется способность глаза различать две близкие точки отдельно друг от друга. Острота зрения является функцией размера колбочки. За среднюю остроту зрения принимают  $60''$ .

Острота зрения зависит от условий наблюдения. При наблюдении изображений на экране (проекции) за разрешающую силу глаза принимают  $2—3'$ , при наблюдении в обычные приборы —  $1'$ , при наблюдении в высококачественные приборы —  $30''$ , а в дальномеры —  $10''$ . Наилучшая острота зрения достигается при освещенности предметов в  $50$  лк и при применении монохроматического света.

Острота зрения возрастает при увеличении диаметра зрачка глаза от  $2$  до  $3$  мм, остается неизменной при  $3—5$  мм и далее падает из-за аберраций оптической системы глаза. Острота зрения имеет максимум при наблюдении черных предметов на белом фоне при освещенности в  $150$  лк, а при наблюдении белых предметов на черном фоне — в  $5—10$  лк.

*Поле зрения* определяется пространством, наблюдаемым неподвижным глазом. Оно равно: книзу  $70^\circ$ , кверху  $55^\circ$ , к носу  $60^\circ$  и к виску  $90^\circ$  ( $125^\circ$  по вертикали и  $150^\circ$  по горизонтали). Движение глаз позволяет увеличить угловую величину просматриваемого пространства. Наибольшее отклонение зрительной оси в сторону достигает  $45—50^\circ$ .

В каждом глазу образуются отдельные изображения, которые в зрительном впечатлении сливаются в одно. Геометрическое место точек пространства, которые видны одиночными, называется *гороптером*. Поле зрения, видимое одновременно обоими глазами, называемое *бинокулярным*, составляет около  $120^\circ$ . *Глазной базис* (расстояние между осями глаз) для различных людей колеблется в пределах от  $58$  до  $72$  мм, составляя в среднем  $65$  мм. При наблюдении близко расположенных предметов глаза поворачиваются, а их оси составляют некоторый угол, называемый *углом конвергенции*. Максимальный угол конвергенции  $32^\circ$ .

Способность глаз ощущать предметы в глубину называется

стереоскопическим зрением, или стереоскопизмом. Такая возможность образуется при наблюдении двумя глазами. Основными факторами стереоскопического зрения являются: 1) конвергенция глаз при одновременной аккомодации, 2) положение изображений на различных расстояниях от центральной ямки в левом и правом глазах.

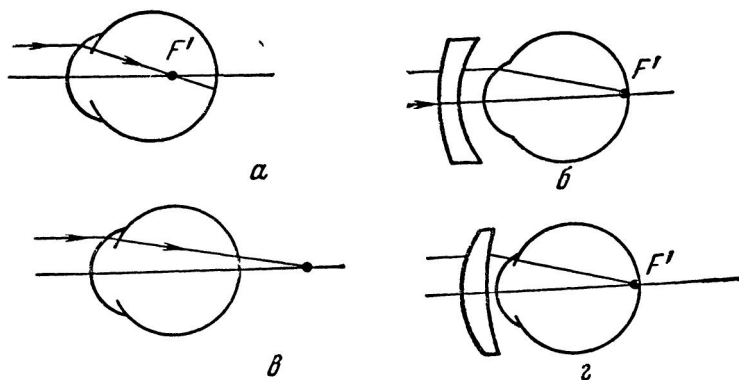


Рис. 68 Недостатки зрения

Глазной базис  $b$  определяет базис стереоскопического зрения, как расстояние между главными точками глаз. Угол с вершиной в точке предмета, образованный визирными осями глаз, называется параллактическим углом  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{b}{R}, \quad (52,1)$$

где  $R$  — дистанция до предмета.

Способность замечать малые различия стереоскопических параллаксов называется остротой стереоскопического зрения  $\eta$ . Она достигает  $10''$ . Рельефно можно видеть и одним глазом — по ощущению мышечных усилий при направлении визирной оси глаза на фиксируемую точку и при аккомодации.

К числу основных недостатков зрения относится близорукость (миопия) и дальнозоркость (гиперметропия). Оптическая сила близорукого глаза увеличена по сравнению с нормальным (эмметропическим). Вследствие этого (рис. 68, а) точка заднего фокуса расположена перед сетчаткой. Наличие объема аккомодации не помогает, так как с увеличением оптической силы глаза точка  $F'$  переместится еще ближе к хрусталику. Для исправления этого недостатка необходима отрицательная линза (рис. 68, б). Без линзы или с помощью объема аккомодации близорукий глаз может рассматривать предметы вблизи.

Оптическая сила дальнозорокого глаза ослаблена в сравнении



с нормальным. Поэтому (рис. 68, в) точка заднего фокуса расположена за сетчаткой. При приближении предметов к глазу точка изображения передвигается еще дальше от сетчатки. Следовательно, дальновзоркий глаз всегда работает с напряжением аккомодации. Для исправления этого недостатка необходима положительная линза (рис. 68, г).

Существуют и другие недостатки: пресбиопия (отсутствие объема аккомодации), астигматизм (различная оптическая сила глаза в различных направлениях), афакия (отсутствие хрусталика), дальтонизм (ошибка в определении цвета) и др.

### § 53. ОПТИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ

Во многих оптических приборах различных конструкций применяются однотипные оптические детали в виде плоскопараллельных пластин, отражательных призм, объективов, коллективов и окуляров. Эти детали и узлы имеют определенные оптические свойства, которые не зависят от принципа устройства того или иного оптического прибора.

**Плоскопараллельные пластины** применяются в виде защитных, покровных, предметных, компенсационных стекол, светофильтров, сеток и зеркал. Оптический расчет их сводится к определению толщины и диаметра. Толщина пластины устанавливается из условий прочности или возможности изготовления точных полированных поверхностей. В последнем случае толщина пластины выбирается порядка  $1/8$ — $1/10$  диаметра. При определении диаметра пластины необходимо учитывать преломление лучей внутри пластины, однако приемом редуцирования можно избежать определения величин углов преломления.

Редуцирование заключается в приведении оптической среды пластины к воздуху путем деления ее толщины на показатель преломления. Найдем разность действительной толщины и редуцированной:

$$d - d_0 = d - \frac{d}{n} = d \left( 1 - \frac{1}{n} \right) = d \frac{n-1}{n}. \quad (53,1)$$

Это уравнение тождественно уравнению (17,2). Следовательно, в редуцированной пластине точка  $P_1'$  (рис. 69) находится на том же месте, где она находилась бы в случае отсутствия пластины. Следовательно, можно рассматривать ход луча в редуцированной пластине без преломления, а так как

$$d - d_0 = L_0, \quad \text{то} \quad h_0 = h.$$

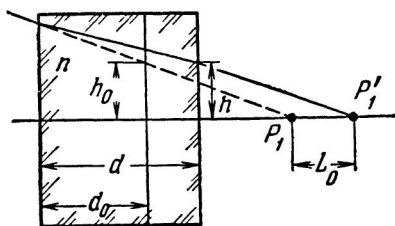


Рис. 69. Оптическое редуцирование

При переходе от редуцированных пластин к действительным необходимо учитывать удлинение хода луча на величину смещения  $L_0$ .

Редуцирование пластин упрощает расчет их диаметра. Если диаметр выходного (или входного) зрачка  $D$ , расстояние от пластины до зрачка  $b$ , толщина пластины  $d$ , показатель преломления  $n$ , а угол луча, выходящего из края зрачка и определяющего наибольший световой диаметр пластины с оптической осью  $\omega$ , то, применяя формулу высот (13,19), получим

$$D_{\text{св}} = D + 2 \operatorname{tg} \omega \left( b' + \frac{d}{n} \right). \quad (53,2)$$

Так как толщина пластин обычно мала, то они вносят ничтожные аберрации. Но в некоторых случаях их специально применяют для компенсации дисторсии, например в некоторых широкоугольных фотообъективах. Толщина покровного стекла, применяемого в микроскопии ( $d=0,17 \text{ мм}$ ), также учитывается на аберрации при вычислении микрообъектива большого увеличения.

Астигматизм, вносимый плоскопараллельной пластинкой, установленной перед плоскостью изображения, определяется величиной астигматической разности  $\Delta_a = x_s' - x_i'$ , где

$$x_m = \left( 1 - \frac{\cos^3 i}{\cos^3 i'} \right) \frac{d}{n}, \quad (53,3)$$

а

$$x_s' = \left( 1 - \frac{\cos i}{\cos i'} \right) \frac{d}{n}. \quad (53,4)$$

Пластинка вносит и дисторсию, определяемую выражением

$$\delta l' = d \operatorname{tg} i \left( 1 - \frac{\operatorname{tg} i'}{\operatorname{tg} i} \right) - L_0 \operatorname{tg} i. \quad (53,5)$$

Если же пластины устанавливаются в параллельных пучках лучей, то они не влияют на аберрации.

Зеркала с внутренним серебрением также относятся к плоскопараллельным пластинам, поставленным под углом к оптической оси. Лучи света в таких зеркалах дважды преломляются на входной поверхности.

Зеркала с наружным отражающим слоем также представляют собой плоскопараллельные пластины, но толщина их не влияет на ход лучей. Размеры таких зеркал определяются только по проекции светового пучка лучей на поверхности. Отражающим слоем обычно является алюминий, в связи с чем такие зеркала называются алюминированными. Такой слой значительно прочней серебряного.

**Отражательные призмы.** Если от одной или нескольких граней призмы происходит отражение пучков лучей, то такая призма называется отражательной.

Отражающие грани призм предназначены для полного отраже-

ния попадающих на них лучей. Если угол падения луча на отражающую грань меньше предельного угла полного внутреннего отражения  $i_m$ , то такая грань должна быть посеребрена, что исключает возможность преломления на этой поверхности.

Для призм обычно выбирают сорта оптических стекол марок К8 с  $n=1,5163$  и БК10 с  $n=1,5688$ . Для этих сред соответственно  $i_m=41^\circ 15' 42''$  и  $i_m=39^\circ 36' 01''$ .

Если на призму (рис. 70) падает луч перпендикулярно к входной поверхности, то отражающую поверхность он встречает под углом  $\alpha$ .

В частном случае прямоугольной призмы  $\alpha=45^\circ$ , а так как этот угол больше предельного угла полного внутреннего отражения, луч отразится полностью вниз.

В общем случае, когда лучи идут к поверхности призм под углом  $\neq 90^\circ$ , может возникнуть опасность преломления на отражающей поверхности. Поэтому следует определить тот критический угол  $i_1$ , начиная с которого происходит преломление на второй поверхности.

Из геометрических соотношений углов (рис. 70) получим

$$i_1 = \alpha - i_m,$$

или

$$\sin i_1 = n \sin(\alpha - i_m). \quad (53,6)$$

Для прямоугольной призмы ( $\alpha=45^\circ$ ) из стекла сорта К8  $i_1=5^\circ 40' 06''$ , а из стекла БК10  $i_1=8^\circ 28' 16''$ .

Удвоенная величина этих углов дает представление об угловом поле зрения того участка оптического прибора, в котором размещена призма, которое не требует серебрения отражающей поверхности.

Отражательные призмы имеют значительное распространение в оптических приборах. Их основным назначением является: 1) изменение направления оптической оси в каком-либо месте прибора, 2) обращение изображения в заданном направлении.

Преломляющая призма может выполнить первое только в том случае, если изменение направления оптической оси мало ( $3-4^\circ$ ), так как в других случаях резкость изображения настолько ухудшается вследствие дисперсии, что пользование прибором становится практически невозможным. Кроме того, преломляющая призма вносит несимметричные aberrации относительно оптической оси, которые невозможно компенсировать линзовой оптикой. Отражательная призма может быть свободна от этого недостатка, но для этого она должна быть эквивалентна плоскопараллельной пластине. Для проверки этого условия призму разворачивают в плоскопараллельную пластину, т. е. находят ее изображение относительно отражающей грани. Если отражающих граней несколько, то последовательно находят эти отражения от каждой грани.

Такая призма, будучи поставлена в прибор, вносит aberrации, равные aberrациям плоскопараллельной пластины. Но если приз-

ма расположена в параллельном пучке лучей, ее aberrации не оказывают практического действия на качество изображения всего прибора. Например, если призма расположена перед объективом зрительной трубы, при помощи которой рассматривают значительно удаленные предметы, то лучи различных длин волн, разложенные на составные части, по выходе из призмы идут параллельно друг другу и собираются объективом трубы в одну точку.

Другое дело, если призма расположена в сходящихся или расходящихся пучках лучей. Тогда она вносит aberrации, которые в большинстве случаев могут компенсироваться aberrациями линзовой части прибора.

Тип призмы определяется геометрической формой в главном сечении. Рассмотрим на примере прямоугольной призмы ее основное назначение и свойства (рис. 71). Как видно из рис. 71, а и 71, б, призма поворачивает оптическую ось на  $90^\circ$  и оборачивает изображение свер-

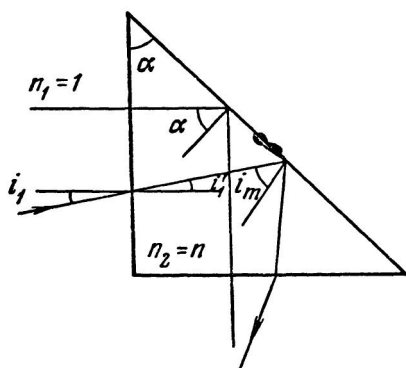


Рис 70. Явление полного внутреннего отражения в прямоугольной призме

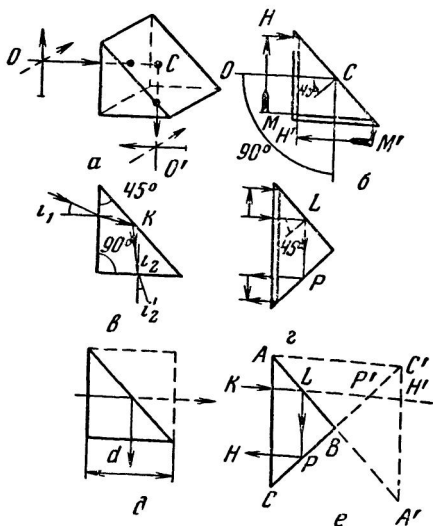


Рис. 71. Прямоугольная призма

ху вниз, т. е. в одном направлении. Развертка такой призмы показана на рис. 71, д. Призма развернулась в плоскопараллельную пластину с толщиной, равной длине хода луча в призме. Длина хода луча в призме  $d$  является важной характеристикой любой отражающей призмы. Отношение длины хода луча в призме к диаметру отверстия пучка лучей  $D$  назовем коэффициентом призмы  $k$ :

$$k = \frac{d}{D} . \quad (53,7)$$

В прямоугольной призме катет определяет величину такого отверстия, следовательно, коэффициент прямоугольной призмы равен единице.

Если лучи входят в призму со стороны гипотенузной поверхности (рис. 71, *з*), то пучок лучей изменяет направление на  $180^\circ$  и смещается. Изображение не оборачивается, так как первая отражающая грань поворачивает изображение, как и прямоугольная призма, сверху вниз, а вторая отражающая грань — снизу вверх. Развертка этой призмы показана на рис. 71, *е*. Длина хода луча  $d=2D$ , т. е.  $k=2$ .

Если на прямоугольную призму падает луч под углом  $i_1$  (рис. 71, *в*), то выходящий из призмы луч не образует с входящим в нее лучом угол в  $90^\circ$ . Конструкции некоторых призм, из числа наиболее распространенных, показаны на рис. 72.

Прямоугольную призму (рис. 72, *а*) можно превратить в призму прямого зрения (призма Дове) (рис. 72, *б*). Такая призма оборачивает изображение сверху вниз, изменяя направление оптической оси только внутри призмы, сохраняя направление вошедшего и вышедшего лучей.

Так как луч, идущий по оптической оси, преломляется, то длина хода луча в призме зависит от показателя преломления и определяется по формуле

$$d = \frac{2nD}{\sqrt{2n^2 - 1} - 1}. \quad (53,8)$$

Длина основания призмы при этом равна

$$l = 2D \frac{\sqrt{2n^2 - 1}}{\sqrt{2n^2 - 1} - 1}. \quad (53,9)$$

Для призмы из стекла К8  $d=3,3812D$  и  $e=2,42299D$ , а для призмы из стекла БК10  $d=3,2001D$  и  $e=4,0398D$ .

Призмой Дове (рис. 72, *б*) пользуются для того, чтобы вращать изображение (или компенсировать вращение изображения) в оптических приборах. Оптический механизм вращения показан на рис. 73. Изображение вращается со скоростью, вдвое большей скорости поворота самой призмы.

Недостатком этой призмы является то, что углы падения лучей на поверхности вверх и вниз от оптической оси несимметричны, а по абсолютной величине значительны ( $45^\circ$  и более), что вызывает астигматизм, поэтому ее применяют только в плоскопараллельных пучках лучей.

Разновидностью семейства прямоугольных призм является призма-ромб (рис. 72, *в*), как бы состоящая из двух прямоугольных призм. Она не оборачивает изображения. Ход луча  $d=2D$ ,  $K=2$ . Призма смещает лучи, оставляя направление входящего и выходящего лучей неизменным. Она находит себе частое применение в бинокулярных приборах для изменения глазного базиса. Верхняя ось может быть неподвижной, а нижняя качаться.

Пентапризма (рис. 72, *з*) поворачивает луч на  $90^\circ$  и не оборачивает изображения. Длина хода луча в ней  $d=3,4142D$ ,  $k=3,4142$ .

Свойством этой призмы является то, что луч, вышедший из призмы, с вошедшим лучом всегда сохраняет угол  $90^\circ$ . Этим обстоятельством пользуются в тех случаях, когда в измерительных целях необходимо строго сохранять между лучами угол  $90^\circ$ , например в дальномерах.

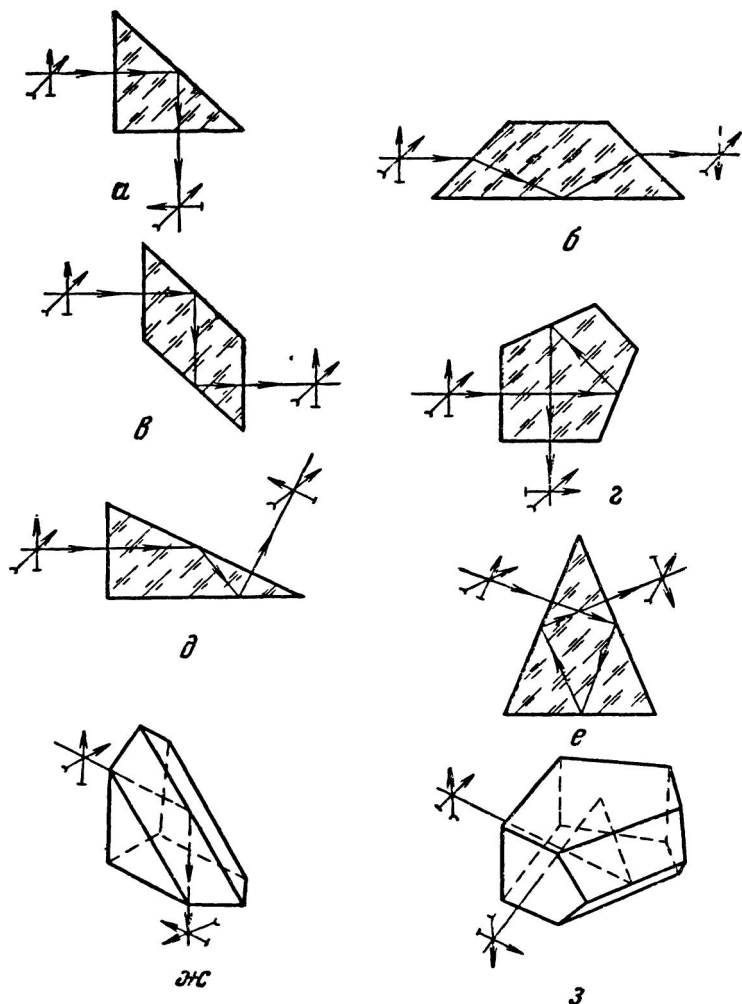


Рис 72 Призмы: *a* — прямоугольная; *б* — призма Дове, *в* — призма-ромб, *г* — пентапризма; *д* — окулярная призма; *е* — призма Шмидта; *ж* — прямоугольная призма с крышей; *з* — пентапризма с крышей

Половина пентапризмы позволяет образовать призму, называемую полупентапризмой (рис. 72, *д*). Она изменяет направление лучей на  $45^\circ$  и не оборачивает изображения. Длина хода луча в призме  $d = 1,7071 D$ , или  $k = 1,7071$ .

Призма нашла себе применение как окулярная призма, изменяющая направление оптической оси прибора на  $45^\circ$  и создающая удобное положение наблюдателю

Особое место среди призм занимают крышеобразные призмы (дах призмы) (рис 72 ж, з) Любую отражающую призму можно превратить в крышеобразную, если одну из отражающих граней заменить двумя, составляющими между собой угол в  $90^\circ$  Назначение крышеобразной призмы — повернуть изображение слева направо Поэтому в оптическом приборе оправдывается появление только одной крышеобразной призмы

Прямоугольная призма с крышей в главном сечении такая же, как обычная прямоугольная Призма с крышей изменяет направление оптической оси на  $90^\circ$  и оборачивает изображение и сверху вниз и справа налево Длина хода ее луча  $d = 1,732 D$ , или  $k = 1,732$  Увеличение хода луча

объясняется тем, что ширина призмы равна  $D$ , а высота должна быть больше, так как в том месте, где крыша на входной и выходной поверхностях образует угол, происходит срезание пучков лучей Это обстоятельство следует иметь в виду для всех крышеобразных призм Изготовление крыши на уже готовой обычной призме уменьшает световое отверстие Крышеобразная пентапризма имеет  $k = 5,031$

В оптических приборах находят себе применение комбинации различных призм, называемые призмными системами (рис 74) В современных призмных биноклях применяется система Малюфеева, изобретенная им в 1827 г и известная под названием системы Порро I рода Такая система из двух прямоугольных призм позволяет получить полное оборачивание изображения

Установим зависимость между числом отражающих граней и оборачиванием изображения Если отражение пучков лучей происходит в одной плоскости, то нечетное число отражающих граней вызывает оборачивание изображения, а четное не вызывает Последнее правило является недействительным, если отражение пучков лучей происходит в разных плоскостях

Призмы ограничивают поле зрения оптических приборов Призма (рис 75) находится перед отверстием оптической системы на расстоянии  $b$  Диаметр отверстия  $D$  В отверстие поступает параллельный пучок лучей Призма развернута в плоскопараллельную пластинку и редуцирована

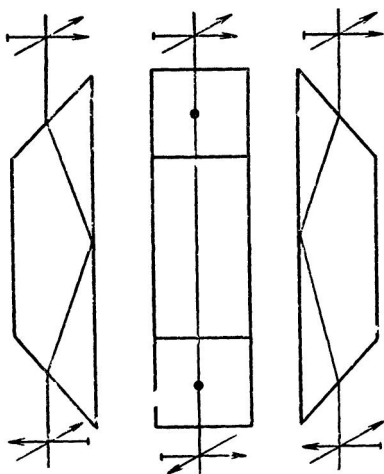


Рис 73 Вращение изображения при вращении призмы Дове

Из рис 75 следует

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{D_k - D}{2\left(\frac{d}{n} + b\right)}.$$

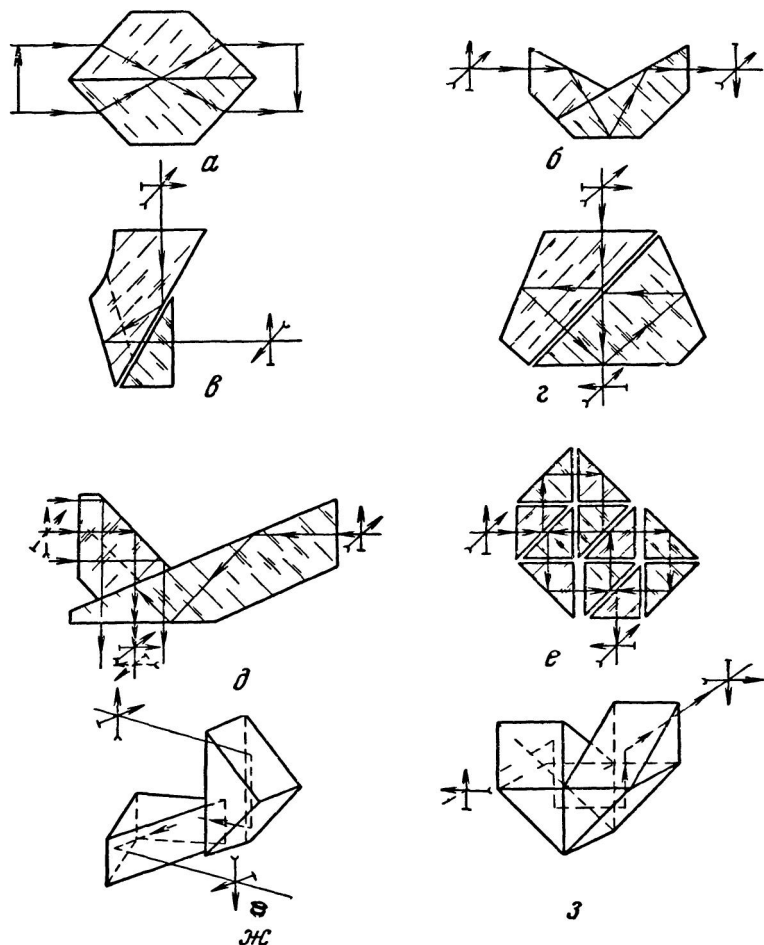


Рис 74 Призмные системы *a* — призма куб, *б* — призма Аббе, *в* — башмачная призма с клином, *г* — призма Пехана, *д* — разделяющая призма дальномера, *е* — система прямоугольных призм, *ж* — система Порро I рода, *з* — система Порро II рода

Но  $d = kD_k$ , где  $k$  — коэффициент призмы, тогда

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{D_k - D}{2\left(\frac{kD_k}{n} + b\right)}. \quad (53,10)$$



Например, прямоугольная призма с крышей, с отверстием  $D_k = 70$  мм из стекла К8 с  $n = 1,5163$ , расположенная перед оптической системой (объективом) со световым отверстием  $D = 20$  мм на расстоянии  $b = 25$  мм, пропускает в оптическую систему пучки лучей под углом  $\omega = 18^\circ 5'$ .

Как видно из рис. 75, в систему проходят лучи и под большим углом, например лучи, показанные пунктиром, но их количество меньше, поэтому освещенность изображения, созданного этими лучами, уменьшена. Для практических целей выбирают отверстие  $D$ , необходимое для работы, и вычисляют возможное поле зрения, исходя из полного заполнения светового отверстия лучами, идущими под углом  $\omega$ .

Рассмотрим влияние призмы на поле зрения в расходящихся пучках лучей (рис. 76). Угловое поле зрения таких систем определяется лучом, показанным пунктиром, направляющимся из края предмета  $T$  в центр светового отверстия  $P$ .

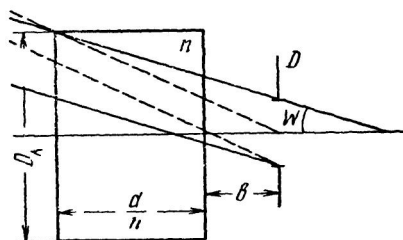


Рис 75 Призма ограничивает поле зрения оптической системы

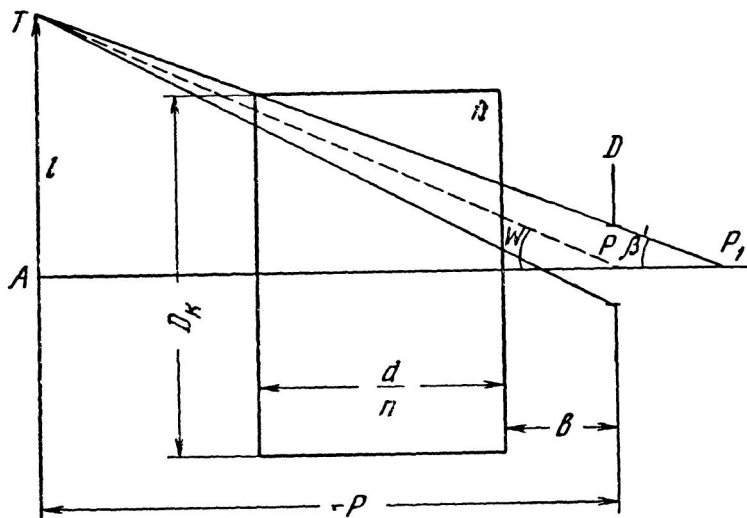


Рис. 76. Влияние призмы на поле зрения при положении предмета на конечном расстоянии от оптической системы

Из рис. 76 следует

$$\operatorname{tg} \omega = -\frac{l}{\rho}.$$

Кроме того,

$$\operatorname{tg} \beta' = -\frac{2l-D}{2\rho} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \beta' = \frac{D_k - D}{2\left(\frac{kD_k}{n} + b\right)}.$$

Находим  $l$ :

$$l = \frac{D}{2} - \frac{\rho(D_k - D)}{2\left(\frac{kD_k}{n} + b\right)}.$$

Подставив последнее выражение для  $\operatorname{tg} \omega$ , получим

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{D_k - D}{2\left(\frac{kD_k}{n} + b\right)} - \frac{D}{2\rho}. \quad (53,11)$$

Для того же численного примера, при  $p = -600$ , имеем  $\omega = 14^\circ 15'$ .

Призмы отрицательно влияют на поле зрения, уменьшая его с увеличением  $k$ .

Если отражательная призма, эквивалентная плоскопараллельной пластине, располагается в параллельном ходе лучей, то она не влияет на aberrации той оптической системы, совместно с которой применяется. Но если она размещается в сходящихся или расходящихся пучках, то aberrации, вносимые ею, следует учитывать путем сложения с aberrациями того объектива, в ходе лучей которого она стоит.

**Пример 23.** Призма рефрактометра имеет показатель преломления  $n = 1,806$ . Определить показатель преломления испытуемого стекла, если измеренный угол полного внутреннего отражения равен  $63^\circ 14' 30''$ .

**Решение.** Дано  $n = 1,806$ ;  $i_m = 63^\circ 14' 30''$ .

Применим формулу

$$n' = n \sin i_m = 1,6126.$$

**Пример 24.** В фотографический аппарат, применяемый для репродукции, введена прямоугольная призма с размером катета  $70$  мм из стекла с  $n = 1,5163$ . Определить астигматическую разность, вносимую призмой, для точек изображения, соответствующих полю зрения  $2\omega = 40^\circ$ .

**Решение.** Используем формулы (53,3) и (53,4), для которых углы преломления  $i'$  найдем по формуле (6,1), учитывая, что  $i_1 = 20^\circ$ :

$$\sin i' = \frac{\sin i}{n} = 0,22556,$$

$i' = 13^\circ 02' 10''$ ;  $\cos i = 0,93970$ ;  $\cos i' = 0,97423$ . Так как  $d = 70$  мм, то  $x_m' = 4,74$  мм и  $x_s' = 1,64$  мм, а следовательно,

$$\Delta a = x_s' - x_m' = 3,10 \text{ мм}.$$

**Объективом** называется линза или система линз оптического прибора, обращенная к предмету. Объектив характеризуется фокусным расстоянием  $f'$ , относительным отверстием и полем зрения  $2\omega$ . В большинстве случаев объектив образует действительное изображение предмета.

Наиболее часто в различных оптических приборах применяется ахроматический двухлинзовый склеенный объектив (см. рис. 52). В некоторых случаях в геодезических и астрономических инструментах он применяется не склеенным.

Угловое поле зрения двухлинзовых объективов достигает 8—12°. Поэтому в тех случаях, когда необходимы более широкоугольные объективы, применяются конструкции фотографических многолинзовых объективов.

Если перед широкоугольным объективом необходимо разместить призмы, то в целях достижения их наименьшего размера необходимо призмы разместить во входном зрачке, а для этого входной зрачок должен быть расположен перед объективом (рис. 75)  $b = -\frac{d}{2n}$ . Так как обычные или фотографические объективы, как правило, имеют входной зрачок внутри, то в качестве объективов применяют конструкции окуляров. При этом окуляры применяют повернутыми на 180° (в обратном ходе) против их обычного положения, чтобы их обычный выходной зрачок совпал со входным зрачком объектива.

**Коллективом**, или коллектором, называется линза, устанавливаемая в плоскости действительного изображения или вблизи ее, назначение которой заключается в том, чтобы отклонить к оптической оси наклонные пучки лучей.

На рисунке 77  $A_1A_1'$  есть отверстие в первой оптической системе, из которого выходит пучок лучей  $A_1BA_1'$ , в направлении  $B_1B_1'$ , показанном пунктиром. Если бы не было линзы, то лучи удалились бы от оптической оси и не смогли бы попасть в отверстие второй оптической системы  $A_2A_2'$ . Лучи, вышедшие из точек  $A_1$  и  $A_1'$ , пересекаются в точке  $B$ . Здесь находится изображение  $l'$ . Коллектив преломляет лучи и направляет их в отверстие  $A_2A_2'$  по направлениям  $A_2B_2$  и  $A_2'B_2'$ . Таким образом, коллектив проектирует выходной зрачок предшествующей оптической системы на входной зрачок последующей. Покажем, что линза, расположенная в плоскости изображения, не влияет на фокусное расстояние эквивалентной системы.

На рисунке 78 показаны две бесконечно тонкие системы  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , где  $\Phi_2$  есть оптическая сила коллектива, установленного в фокальной плоскости первой системы  $\Phi_1$ .

По формуле оптической силы двух систем (49,5) имеем

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - f'\Phi_1\Phi_2,$$

где  $\Phi_2 = \frac{1}{f'}$ , тогда  $\Phi = \Phi_2$ . Аналогичным образом можно рассмот-

реть и взаимодействие коллектива и второй системы  $A_2A_2'$  (рис. 77).

Коллектив не влияет на ход пучка лучей, идущего из точки на оси оптической системы, а влияет на ход наклонных лучей.

Найдем оптическую силу коллектива  $\Phi_2$ , расположенного в фокальной плоскости между двумя оптическими системами с опти-

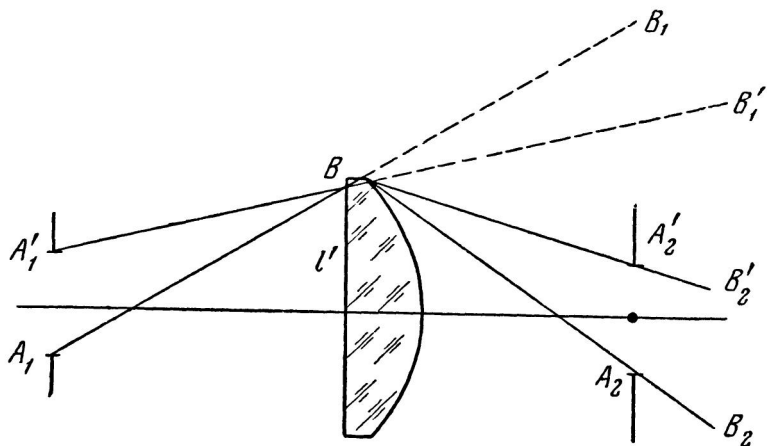


Рис. 77. Коллектив (коллектор)

ческими силами  $\Phi_1$  и  $\Phi_3$  (рис. 79). Рассмотрим общий случай, когда луч выходит из точки  $P_1$  перед первой системой, а по выходе из третьей системы пересекает оптическую ось в точке  $P_3'$ . Коллектив расположен в заднем фокусе первой оптической системы и в переднем фокусе второй.

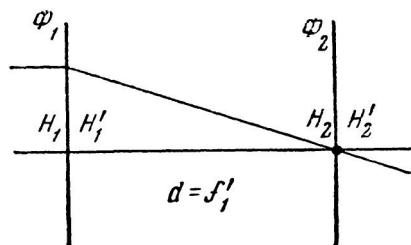


Рис. 78. Коллектор не влияет на фокусное расстояние эквивалентной системы

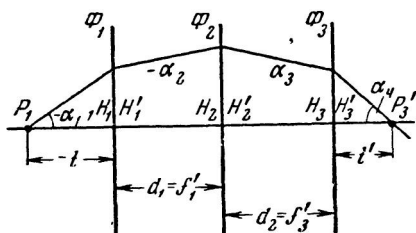


Рис. 79. К выводу формулы коллектора

Воспользуемся формулами углов и высот (48,3) и (13,19). Примем  $h_1=1$ , тогда  $\alpha_1 = \frac{1}{t}$ , далее

$$\alpha_2 = \alpha_1 + h_1\Phi_1 = \frac{1}{t} + \Phi_1$$

и

$$h_2 = h_1 - \alpha_2 d_1,$$

а так как

$$d_1 = \frac{1}{\Phi_1},$$

$$h_2 = 1 - \left( \frac{1}{t} + \Phi_1 \right) \frac{1}{\Phi_1} = -\frac{1}{t\Phi_1}.$$

Аналогично найдем  $\alpha_3$  и  $h_3$ , имея в виду, что

$$d_2 = \frac{1}{\Phi_3};$$

$$\alpha_3 = \alpha_2 + h_2 \Phi_2 = \frac{1}{t} + \Phi_1 - \frac{\Phi_2}{t\Phi_1}$$

и

$$h_3 = h_2 - \alpha_3 d_2 = -\frac{1}{t\Phi_1} - \left( \frac{1}{t} + \Phi_1 - \frac{\Phi_2}{t\Phi_1} \right) \frac{1}{\Phi_3}.$$

Далее,  $\alpha_4 = \alpha_3 + h_3 \Phi_3$  и  $\alpha_4 = \frac{h_3}{t'}$ , тогда после подстановки

$\alpha_3$  и  $h_3$  и преобразований получим

$$\Phi_2 = \Phi_1(1 + t\Phi_1) + \Phi_3(1 - t'\Phi_3). \quad (53,12)$$

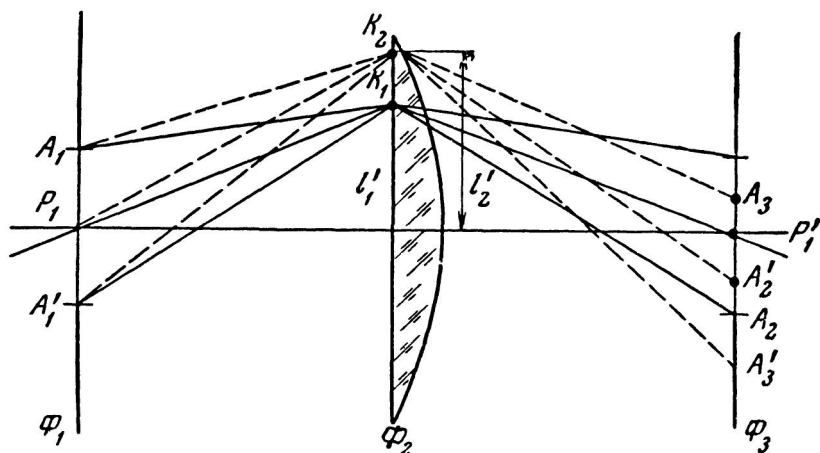


Рис. 80. Сферическая aberrация коллектора

Правильной работе коллектива мешает сферическая aberrация. При отсутствии сферической aberrации средние лучи  $P_1K_1$  и  $P_1K_2$  (рис. 80) пересекались бы в пространстве изображений точку  $P'_1$ . Оптическая сила коллектива выбрана таким образом, чтобы средний луч пучка лучей  $A_1K_1A'_1$  после преломления пересекал оптиче-

скую ось в центре отверстия  $P_1'$ . Вследствие сферической аберрации средний луч пучка  $A_1K_2A_1'$ , являющийся главным лучом, пересекает это отверстие в точке  $A_2'$ . Поэтому часть пучка лучей из точки  $K_2$ , а именно  $A_2A_3'$ , не пройдет далее. Сферическая аберрация коллектива влияет на распределение освещенности по полю изображения.

Если оптическая сила коллектива подобрана так, чтобы луч из точки  $K_2$  проходил через точку  $P_1'$ , то средний луч пучка из точки  $K_1$  пересекает оптическую ось правее точки  $P_1$  и в этом случае задерживаются лучи в верхней части пучка, выходящего из точки  $K_1$ .

Покажем действие сферической аберрации коллектива в виде плоско-выпуклой линзы с данными:

$$\begin{array}{ll} r_1 = 100 \text{ мм} & n_1 = 1 \\ & d_1 = 20 \text{ мм} \quad n_2 = 1,5187 \\ r_2 = \infty & n_3 = 1 \end{array}$$

Фокусное расстояние коллектива 192,8 мм. Лучи выходят из точки  $P_1$  на расстоянии 385,6 мм перед коллективом. Сферическая аберрация такой линзы, показанная ниже, вызывает сферическую аберрацию в зрачках.

Т а б л и ц а 6

Апертурный угол $u_1$		3°30"	5°42'22"	7°09'39"
Сферический коллектив	сферические аберрации	-24,1	-61,5	-93,9
Асферический коллектив	$\delta's$ , мм	0,012	0,008	-0,045

Применение же асферического коллектива, выпуклая поверхность которого удовлетворяет уравнению  $x = Ay^2 + By^4 + Cy^6 + Dy^8 + Ey^{10} + Fy^{12}$ , где  $A=0,005$ ;  $B=-0,1974 \cdot 10^{-7}$ ;  $C=0,1797 \cdot 10^{-11}$ ;  $D=-0,1223 \cdot 10^{-14}$ ;  $E=0,5401 \cdot 10^{-18}$  и  $F=0,8258 \cdot 10^{-22}$ , не только устраняет эту аберрацию, но и резко улучшает изображение в точках изображения, удаленных от оптической оси.

**Окуляр.** Для того чтобы нормальный глаз человека мог рассмотреть изображение, образованное оптической системой, без напряжения аккомодации, необходимо, чтобы из системы лучи выходили в виде параллельных пучков. Эту роль выполняет последняя линзовая система прибора, называемая окуляром. При помощи окуляра глаз рассматривает изображение, образованное предшествующими окуляру частями оптической системы. Окуляр

как бы выполняет роль лупы. Только через лупу рассматривают предметы непосредственно, а через окуляры — изображение предметов.

Окуляр характеризуется следующими величинами: 1) фокусным расстоянием  $f'$ ; 2) видимым увеличением  $\bar{\Gamma} = \frac{250}{f_1}$ ; 3) полем зрения  $2\omega'$ ; 4) диаметром выходного зрачка  $D'$ ; 5) положением выходного зрачка  $t'$ ; 6) расстоянием от рассматриваемого предмета (изображения) до первой поверхности  $S_F$ .

Принципиальная оптическая схема окуляра показана на рис. 81. Поверхности окуляра показаны пунктиром. Предмет расположен в плоскости изображений (передняя фокальная плоскость окуляра). Глаз наблюдателя устанавливается в центре выходного зрачка. Условие наблюдения требует достаточного удаления выходного зрачка от окуляра, чтобы все пучки лучей попали в зрачок глаза. Расстояние  $s_F$  имеет значение в случае расположения сетки

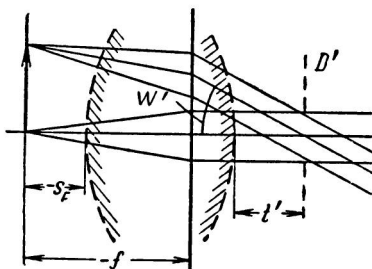


Рис. 81. Окуляр

в передней фокальной плоскости окуляра или призмы между передней фокальной плоскостью и первой поверхностью окуляра. Для фокусировки на резкость изображения сетки необходимо изменять расстояние между сеткой и окуляром, а малое  $s_F$  не позволяет разместить призму в этом пространстве.

Отметим, что с увеличением фокусного расстояния становится возможным применять более широкоугольные окуляры. Увеличение поля зрения окуляров препятствуют aberrации окуляра, в первую очередь астигматизм и кривизна поля. Если найти линейные aberrации, соответствующие одинаковым aberrациям в диоптриях при различных фокусных расстояниях, то окажется, например, что для меридиональной кривизны изображения  $L_m = 3,6$  и  $f' = 10$  мм имеем угол поля зрения  $\omega' = 18^\circ$ , а для  $f' = 40-50$  мм угол поля зрения  $\omega' = 35^\circ$ .

Простейшим окуляром может быть простая линза. Но она редко применяется без коллектива, роль которого была уже рассмотрена. Поэтому, как минимум, каждый окуляр состоит из двух линз. Первая линза со стороны передней фокальной плоскости окуляра называется *коллективом*, а со стороны глаза — *глазной*. Эти наименования сохранились и для более сложных окуляров.

В тех случаях, когда поле зрения не превосходит  $2\omega' = 30^\circ$ , рекомендуется применять окуляры, состоящие из двух плоско-выпуклых линз.

Наиболее распространенные конструкции окуляров показаны на рис. 82.

**Окуляр Гюйгенса.** Линзы плоской стороной обращены к наблю-

дателью, и плоскость изображения, образованная предыдущей системой, расположена между линзами. Такие окуляры обычно применяются в микроскопах. Их достоинством является сокращение длины системы, а недостатком — затруднения в установке сетки в фокальной плоскости. Вычисление конструктивных данных

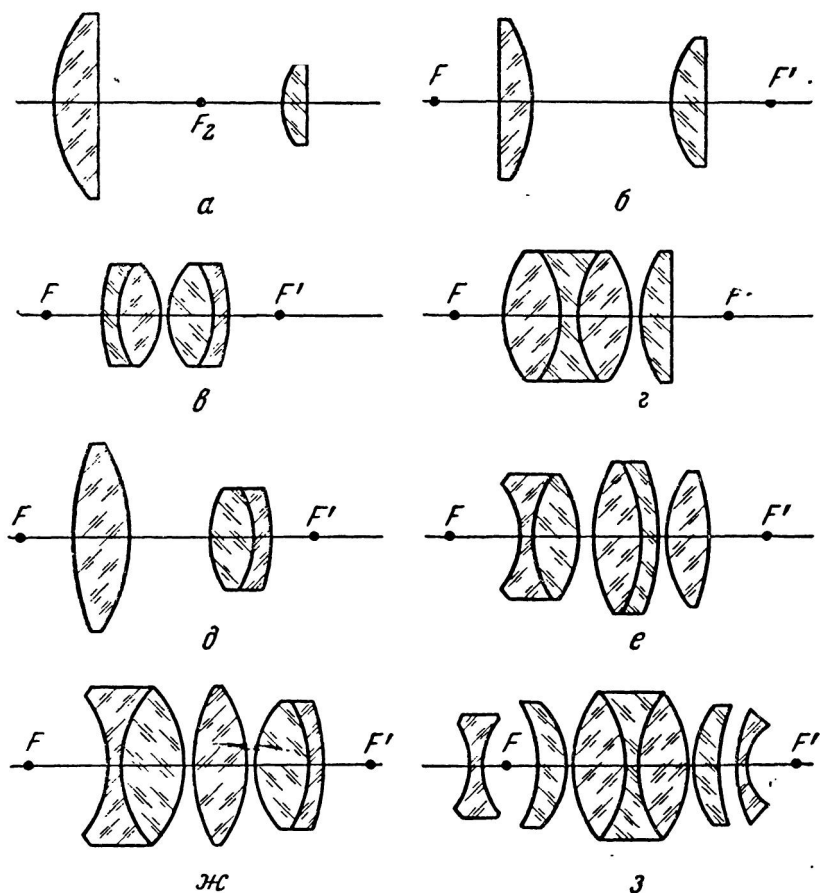


Рис. 82. Типы окуляров: *a* — окуляр Гюйгенса,  $2\omega=30^\circ$ ; *б* — окуляр Рамдена,  $2\omega=30^\circ$ ; *в* — симметричный окуляр,  $2\omega=40^\circ$ ; *г* — ортоскопический окуляр,  $2\omega=40^\circ$ ; *д* — окуляр Кельнера,  $2\omega=45^\circ$ ; *е* — окуляр с удаленным зрачком,  $2\omega=50^\circ$ ; *ж* — окуляр Эрфле,  $2\omega=60^\circ$ ; *з* — широкоугольный окуляр,  $2\omega=88^\circ$

такого окуляра с фокусным расстоянием  $f'$  рекомендуется производить с соблюдением следующих условий.

1. Для окуляров с увеличением не свыше  $5\times$ :

$$f'_1 = 0,85f'; f'_2 = 0,57f'; d = 0,92f'; \text{стекло К9.}$$



2 Для окуляров с увеличением не свыше  $8^x$

$$f'_1 = 1,25f', f'_2 = 0,7f', d = 1,05f', \text{ стекло } \Phi 1.$$

3 Для окуляров с увеличением не свыше  $15^x$

$$f'_1 = 1,6f', f'_2 = 0,85f', d = 1,15f'.$$

Стекла для окуляра  $10^x$  марок  $\Phi 1$  и  $K9$ , а для  $15^x$  —  $T\Phi 1$  и  $K9$   
**Окуляр Рамсдена.** Одинаковые плоско-выпуклые линзы обращены выпуклыми сторонами друг к другу. Применяя формулу оптической силы (49,5), при  $\Phi_1 = \Phi_2$  имеем

$$\Phi = 2\Phi_1 - d\Phi_1^2,$$

где  $d$  — расстояние между линзами

Отсюда, используя решение с наибольшими  $f'$ , получим

$$\Phi_1 = \frac{1 - \sqrt{1 - d\Phi}}{d}. \quad (53,13)$$

Найдем зависимости между  $d$  и  $f'_1$ , а также  $f'_1$  и  $f'$ , исходя из условия

$$d = 0,75f'. \quad (53,14)$$

Зависимость между  $d$  и  $f'_1$  может быть выражена уравнением

$$d = xf'_1.$$

Подставив это уравнение в формулу для  $\Phi$ , получим

$$\Phi = \Phi_1(2 - x).$$

Далее введем последнее уравнение в (53,14)

$$\frac{0,75}{\Phi_1(2 - x)} = xf'_1,$$

и после подстановки получим  $x = 0,5$ , тогда

$$d = 0,5f'_1 \quad (53,15)$$

и

$$f_1 = 1,5f'. \quad (53,16)$$

Вершинное фокусное расстояние найдем по формуле (49,6), положив  $\Phi_1 = \Phi_2$ ,

$$a' = \frac{1 - \Phi_1 d}{\Phi_1(2 - \Phi_1 d)}.$$

Учитывая положение главной плоскости в плоско-выпуклой линзе с толщиной  $d_3$  на расстоянии  $\frac{d_3}{n}$ , окончательно получим

$$-s_F = s'_F = \frac{1 - \Phi_1 d}{\Phi_1 (2 - \Phi_1 d)} - \frac{d_3}{n}. \quad (53,17)$$

Для тонкой системы

$$s'_F = 0,333f'_1. \quad (53,18)$$

Окуляр в приборе обычно имеет некоторое перемещение (фокусировку) вдоль оптической оси с целью приспособления к недостаткам глаз наблюдателя в пределах до  $\pm 7$  диоптрий ( $L_T$ ). Фокусировка окуляра позволяет близорукому или дальнозоркому глазу производить наблюдение без напряжения.

Для определения линейного перемещения окуляра, соответствующего тому или иному числу диоптрий, можно воспользоваться формулой (37,1), в которой под  $x_m$  понимается линейное смещение  $x$ , а под  $L_m$  — число диоптрий  $L_T$ . Тогда формула фокусировки окуляром примет вид

$$x = \frac{L_T f'^2}{1000}. \quad (53,19)$$

Для близорукого глаза окуляр вдвигается, а для дальнозоркого выдвигается.

**Пример 25.** Определить конструктивные элементы окуляра типа Рамсдена с видимым увеличением  $10^x$ .

**Решение:** Дано:  $\bar{\Gamma} = 10$ , отсюда  $f' = \frac{250}{\bar{\Gamma}} = 25$  мм.

Применим формулы (53,16), (53,15):

$$f'_1 = 1,5f' = 1,5 \cdot 25 = 37,5 \text{ мм},$$

$$d_2 = 0,5f'_1 = 0,5 \cdot 37,5 = 18,75 \text{ мм},$$

$$-s_F = s'_F = 10,52 \text{ мм}.$$

Кривизну поверхностей найдем по формуле плоско-выпуклой линзы (21,4). В качестве сорта оптического стекла линз окуляра примем сорт К8 с  $n = 1,5163$ ,

$$r = (n - 1)f'_1 = 0,5163 \cdot 37,5 = 19,35 \text{ мм}.$$

Толщины и диаметры линз примем одинаковыми, хотя наибольший диаметр обычно должна иметь коллективная линза.

Диаметр линзы определяется полем зрения. Так как для окуляра типа Рамсдена  $2\omega' = 30^\circ$ , то ожидаемый диаметр изображения в передней фокальной плоскости равен  $2f' \operatorname{tg} 15^\circ$ , т. е. для данного случая 13,4 мм. Диаметр линзы обычно несколько больше

диаметра изображения. Примем световой диаметр линз 15 мм, а полный 16 мм. Толщина линзы найдется из графического построения кривизны поверхности из того расчета, чтобы толщина линзы по краю была 1—2 мм. Тогда  $d_1 = d_2 = 3$ . Полученные конструктивные данные покажем в виде таблицы:

$r_1 = \infty$	$d_1 = 3$ мм К8	Полный $\varnothing = 16,0$ мм
$r_2 = -19,35$ мм	$d_2 = 18,75$ мм	
$r_3 = 19,35$ мм	$d_3 = 3$ мм К8	Световой $\varnothing = 15,0$ мм
$r_4 = \infty$		

## § 54. ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Оптические системы, предназначенные для наблюдения сильно удаленных предметов, называются *телескопическими*. Их отличительным оптическим свойством является то, что в систему лучи поступают в виде параллельных пучков и выходят из системы также в виде параллельных пучков. Эти системы применяются для визуального наблюдения предметов. Предметы наблюдаются в виде изображений, образованных оптической системой, под значительно большими углами, чем при рассмотрении их невооруженным глазом. Вследствие этого происходит искажение перспективы. Все предметы представляются приближенными к наблюдателю, а пространство предметов сжатым по направлению наблюдения.

Простейшая телескопическая система состоит из двух элементов: объектива и окуляра. Чтобы удовлетворить условию параллельности сопряженных пучков лучей в пространстве предметов и в пространстве изображений, необходимо, чтобы задний фокус объектива совпадал с передним фокусом окуляра. Оптическая длина такой системы равна сумме фокусных расстояний объектива и окуляра.

Если в качестве окуляра применена положительная оптическая система (например, симметричный окуляр), то такая оптическая система, дающая обратное изображение, называется *системой Кеплера*. К таким системам относятся зрительные трубы геодезических и астрономических инструментов. Ход лучей в такой системе показан на рис. 83. Объектив является входным зрачком. Он образует изображение величиной  $2l'$  в передней фокальной плоскости окуляра. Выходной зрачок системы расположен за окуляром. Глаз наблюдателя, помещенный в выходном зрачке, сможет рассмотреть все изображение, так как через выходной зрачок проходят все пучки лучей.

Если в качестве окуляра применена отрицательная оптическая система, то такая система называется *системой Галилея*. Она имеет применение в театральном бинокле. Ход лучей в тонкой системе

Галилея показан на рис. 84. Такая система дает прямое изображение, отличается малым полем зрения и имеет вследствие этого ограниченное применение.

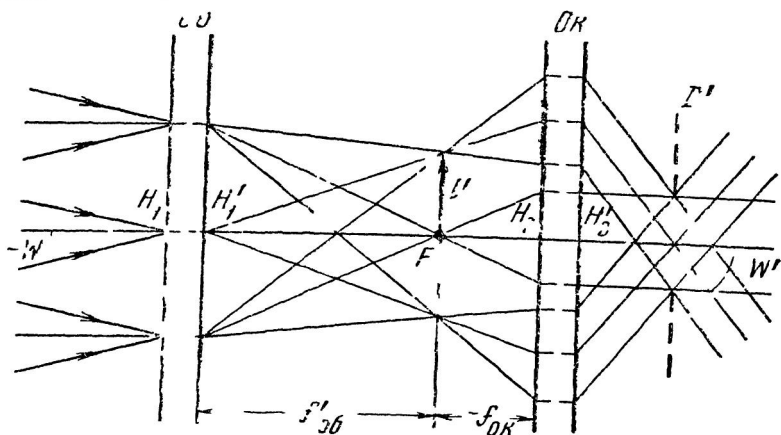


Рис 83 Оптическая схема простой зрительной трубы

Ее преимуществом является сокращение длины, что наглядно показано на рис. 85. При одинаковых фокусных расстояниях объектива и окуляра система Галилея короче системы Кеплера на два фокусных расстояния окуляра.

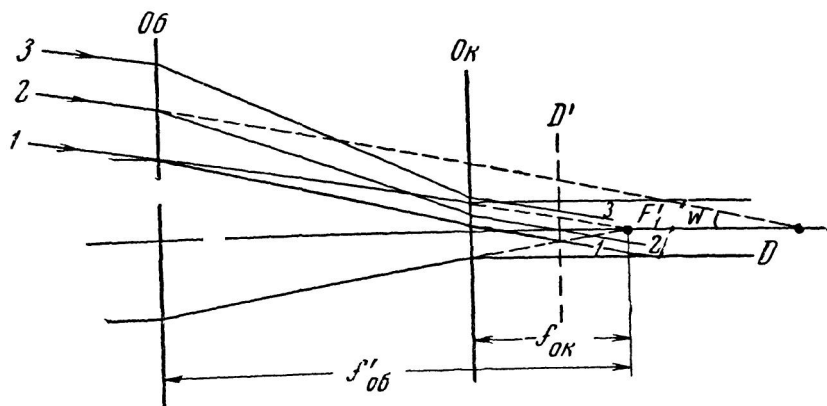


Рис. 84. Оптическая схема театрального бинокля (система Галилея)

Главными оптическими характеристиками телескопической системы являются: 1) видимое увеличение  $\Gamma$ ; 2) поле зрения  $2\omega$ ; 3) диаметр выходного зрачка  $D'$ .

Величина изображения  $l'$ , образованного объективом, очевидно, равна (рис 83)

$$l' = -f_{об} \cdot \text{tg } \omega,$$

а со стороны окуляра

$$l' = -f_{ок} \cdot \text{tg } \omega'.$$

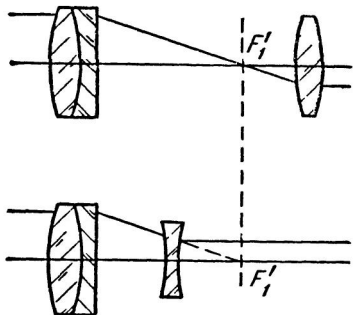


Рис 85 Сравнение длин зрительных труб

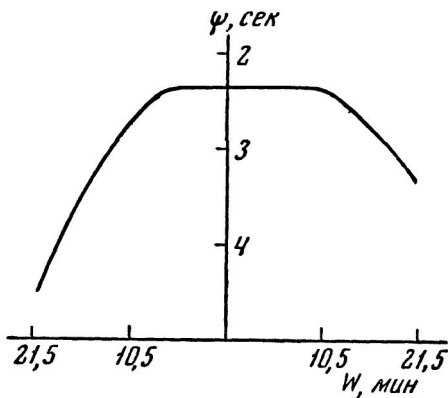


Рис 86 Разрешающая способность главной трубы ТТ2/6,  $D=65$  мм

Отсюда

$$\frac{\text{tg } \omega'}{\text{tg } \omega} = \frac{f'_{об}}{f_{ок}}.$$

Отношение тангенсов углов есть видимое увеличение. Тогда, переходя к  $f'_{ок} = -f_{ок}$ , получим

$$\Gamma = -\frac{f'_{об}}{f_{ок}}. \quad (54,1)$$

Знак минус указывает на то, что изображение обратное. Из подобия треугольников, имеющих общую вершину, установим

$$\Gamma = \frac{D}{D'}. \quad (54,2)$$

Обычно знак минус в формуле видимого увеличения опускается.

Видимым увеличением телескопической системы называется отношение диаметра входного зрачка к диаметру выходного зрачка.

Диаметр входного зрачка выбирается из условия разрешающей способности (40,2), а диаметр выходного зрачка — из условия видимого увеличения (54,2). Поле зрения телескопической системы ограничивается полем зрения окуляра. Принимая за наи-

большее угловое поле зрения окуляра  $2\omega' = 100^\circ$ , получим возможный угол поля зрения системы

$$\operatorname{tg} \omega_{\max} = \frac{\operatorname{tg} 50^\circ}{\Gamma}. \quad (54,3)$$

Однако следует иметь в виду, что в некоторых случаях, поступаясь качеством изображения, применяют окуляры и с полем зрения до  $2\omega' = 140^\circ$ .

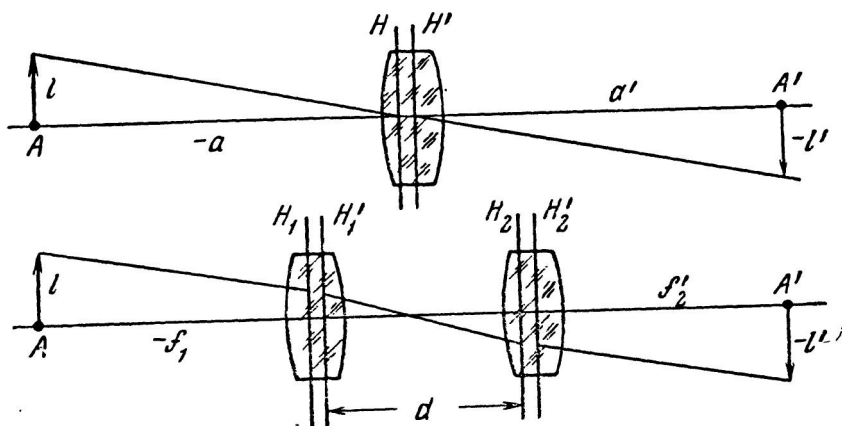


Рис. 87. Оборачивающая система

При рассмотрении необходимой разрешающей способности зрительных труб надо учитывать разрешающую способность глаза. За разрешающую способность глаза обычно принимают  $60''$ , хотя исследования\* указывают на значительно бóльшие возможности глаза. Так, например, глаз различает черные штрихи на белом фоне даже в том случае, когда их угловая величина достигает  $6''$ . Исходя из формулы (23,1), запишем необходимую разрешающую способность зрительной трубы (в секундах)

$$\psi = \frac{60}{\Gamma}. \quad (54,4)$$

Учитывая формулу (51,3), получаем зависимость между диаметром входного зрачка и видимым увеличением зрительной трубы, т. е. формулу полезного увеличения зрительной трубы

$$\Gamma_{\text{п}} = 0,5D. \quad (54,5)$$

*Полезным увеличением* называется то наименьшее увеличение

\* См. С. В. Кравков. Глаз и его работа. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1950, стр. 382.

зрительной трубы, при котором разрешающая сила объектива может быть полностью использована глазом наблюдателя.

В действительности для геодезических зрительных труб, для которых особенно важно полное использование разрешающей способности глаза, между диаметром входного зрачка и видимым увеличением существует в среднем зависимость (по данным зрительных труб СССР и Германии)

$$\Gamma_n = 0,74D. \quad (54,6)$$

Оценку разрешающей способности телескопических систем всегда производят в угловой мере. На рис. 86 показана характеристическая кривая разрешающей способности главной трубы триангуляционного теодолита, измеренная при наблюдении без фильтра. Асимметрия кривой разрешающей способности является показателем нарушения центрированности оптической системы.

В табл. 7 указывается разрешающая способность некоторых стечественных приборов в центре поля.

Таблица 7

Инструмент	Видимое увеличение	Диаметр входного зрачка	Разрешающая способность	
			теоретическая	действительная
Главная труба триангуляционного теодолита ТТ2/6 . . . . .	52	65	1",9	2",3
Поверительная труба триангуляционного теодолита ТТ2/6 . . . . .	40	40	3",1	4",0
Оптический теодолит ОТ . . . . .	30	60	2",0	2",3
Прецизионный нивелир НПГ . . . . .	44	55	2",2	2",6

Длина простой зрительной трубы равна

$$L = f'_{об} + f'_{ок}. \quad (54,7)$$

Если оптическая система должна быть длинной (цистоскоп, перископ, смотровые трубки и т. п.), то между объективом и окуляром помещают оборачивающие системы. Они предназначаются для поворота изображения на 180° вокруг оптической оси и удлинения хода лучей в приборе. Применяются линзовые оборачивающиеся системы двух типов, однообъективные и двухобъективные (рис. 87). В двухобъективной системе между объективами лучи идут в виде параллельных пучков. Длина однообъективной системы равна

$$L_{oc} = -a + a'.$$

Длина двухобъективной системы равна

$$L_{oc} = -f_1 + d + f'_2.$$

Таким образом, общая длина телескопической системы, включающей оборачивающие системы, определяется уравнением

$$L = f'_{об} + \sum L_{oc} + f'_{ок}. \quad (54,8)$$

Каждую оборачивающую систему можно характеризовать линейным увеличением. Оборачивающие системы влияют на видимое увеличение всего прибора. Если  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_k$  — линейные увели-

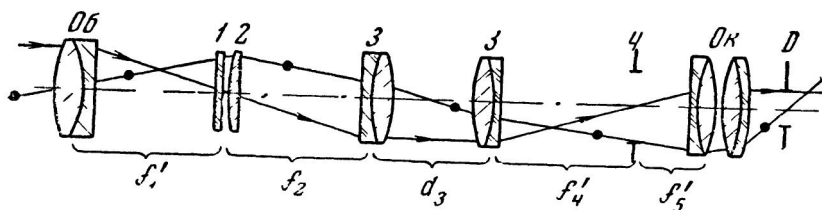


Рис 88 Зрительная труба с прямым изображением 1 — сетка; 2 — коллектор, 3 — оборачивающая система, 4 — полевая диафрагма

чения оборачивающих систем, то видимое увеличение может быть найдено по формуле

$$\Gamma = -\beta_1 \beta_2 \dots \beta_k \frac{f'_{об}}{f'_{ок}}. \quad (54,9)$$

Сложные зрительные трубы вместо оборачивающих линзовых систем (рис. 88) могут иметь и призмённые оборачивающие системы (например, призмённый бинокль).

Габариты телескопической системы определяются длиной и диаметром. Длина системы зависит от фокусных расстояний объектива, окуляра, объективов оборачивающих систем и расстоянии между объективами оборачивающих систем. Диаметр системы зависит от относительных отверстий, углов поля зрения, коэффициента виньетирования и положения зрачков.

Расчет габарита предшествует составлению технических условий на систему. Кроме основных характеристик в технические условия включаются требования к виду изображения (прямое или обратное), длине системы, наличию качающихся или вращающихся деталей и т. п.

Расчет габарита разделяется на две части: 1) определение фокусных расстояний компонентов и расстояний между ними; 2) расчет диаметров деталей и узлов.

Первоначально определяются фокусные расстояния всех компонентов, составляющих систему, и расстояния между ними. При расчете габарита толщины всех линзовых деталей и узлов принимаются равными нулю, тогда все линзы, объективы и окуляр изображаются в виде главных плоскостей, а отражающие призмы и пластины редуцируются к воздуху.



Оптическая система, заданная основными характеристиками  $(\Gamma, 2\omega, D, L)$ , может быть осуществлена при различных фокусных расстояниях компонентов

Покажем основы расчета габарита сложной телескопической системы, имеющей двухобъективную оборачивающую систему (рис 88) Для внесения определенности в расчет положим известным фокусное расстояние окуляра Выбор его обуславливается соображениями удобного размещения глаза наблюдателя (например,  $f_5' = 20 \text{ мм}, 25 \text{ мм}, 30 \text{ мм}$  или  $40 \text{ мм}$ )

Заданными характеристиками являются 1) видимое увеличение  $\Gamma$ , 2) поле зрения  $2\omega$ , 3) диаметр выходного зрачка  $D'$ , 4) длина оптической системы от объектива до окуляра  $L$ , 5) коэффициент виньетирования  $k\omega$ , 6) фокусное расстояние окуляра  $f_5'$ , 7) положение входного зрачка от объектива  $t$ , 8) линейное увеличение  $\beta$  оборачивающей системы, равное отношению  $f_4'$  к  $f_3'$  (обычно  $\beta = -1$ )

Формулы для расчета габарита следующие\*

$$f_1 = -\frac{\Gamma f_5'}{\beta} \quad f_3 = \frac{D' (1 - K\omega)}{f_5'^2 \Gamma \operatorname{tg} \omega_1} + f_3 (1 - \beta) + f_5 (\Gamma + 1) - L - 0$$

$$f_4 = -\beta f_3' \quad d_3 = L - f_1 - f_3' - f_4' - f_5$$

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{f_1} \left( 1 + \frac{t}{f_1} \right) + \frac{1}{f_3} \left( 1 - \frac{d_3}{2f_3'} \right)$$

$$D_1 = Dk\omega - 2t \operatorname{tg} \omega_1 \quad D_2 = 2 \operatorname{tg} \omega_1 f_1$$

$$D_3 = \frac{Df_3}{f_1} \quad D_4 = D_3$$

Если вычисленный диаметр объектива  $D_1$  меньше диаметра входного зрачка  $D$ , то за световой диаметр объектива принимается диаметр входного зрачка  $D$  Диаметр окуляра определяется наибольшими высотами действительного луча, проходящего через окуляр под наибольшим углом поля зрения Определение диаметров компонентов, составляющих оптическую систему, дублируется вычислением высот и углов осевого и наклонных лучей по формулам (48,3) и (48,4) При вычислении осевого луча начальными параметрами служат

$$u_1 = 0 \quad \text{и} \quad h_1 = \frac{D}{2} .$$

В результате получается  $u_{\text{посл}} = 0$ , что является проверкой правильности выполненных вычислений (проверка телескопичности)

При определении хода наклонного пучка лучей выполняют вычисление трех лучей, верхнего, главного и нижнего, по тем же

\* Для  $\operatorname{tg} \omega_1$  принимается положительное значение.

формулам. При вычислении главного луча начальными параметрами служат

$$\operatorname{tg} u_1 = \operatorname{tg} \omega, \quad h_1 = t \operatorname{tg} \omega,$$

где  $t$  — расстояние от первого компонента системы (объектива) до входного зрачка. Вычисление главного луча позволяет найти расстояние от последнего компонента системы (окуляра) до выходного зрачка:

$$t' = \frac{h_{\text{посл}}}{\operatorname{tg} u_{\text{посл}}}.$$

При вычислении верхнего и нижнего пучка учитывается коэффициент виньетирования  $K_w$ .

При вычислении верхнего луча начальными параметрами являются

$$\operatorname{tg} u_1 = \operatorname{tg} \omega \quad \text{и} \quad h_1 = t \cdot \operatorname{tg} \omega + \frac{K_w D}{2},$$

а для нижнего

$$\operatorname{tg} u_1 = \operatorname{tg} \omega \quad \text{и} \quad h_1 = t \cdot \operatorname{tg} \omega - \frac{K_w D}{2}.$$

В результате вычислений всех трех последних лучей  $u_{\text{посл}}$  должны быть одинаковыми. Наибольшие высоты на каждом компоненте системы определяют световые диаметры ( $\Phi = 2h$ ).

Телескопические приборы охватывают большую группу оптических приборов. В различных отраслях техники эти приборы получили свое самостоятельное развитие, обусловленное условиями эксплуатации и точностями определения тех или иных параметров.

Основными группами приборов являются: 1) астрономические, 2) геодезические, 3) зрительные трубы, 4) бинокли, 5) перископы, 6) прицелы винтовочные, 7) прицелы пулеметно-минометные, 8) прицелы танковые, 9) прицелы артиллерийские, 10) прицелы авиационные, 11) дальномеры.

Некоторые из оптических приборов настолько хорошо конструктивно отработаны, что сохраняют оптическое устройство и конструкцию на протяжении многих десятилетий. К таким оптическим приборам относится стереотруба (рис. 89), предназначенная для стереоскопического рассмотрения из-за укрытий. Подобные бинокулярные оптические приборы состоят из двух однотипных половинок для левого и правого глаза. Зрительные трубы являются составной частью многих приборов в пиromетрии, фотограм-

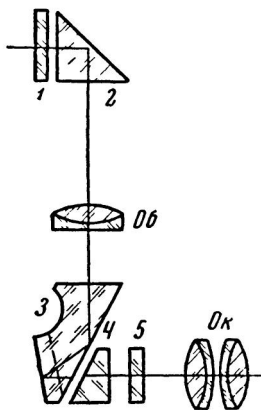


Рис. 89. Оптическая система стереотрубы: 1 — защитное стекло; 2 — головная призма; 3 — башмачная призма с крышкой; 4 — клин; 5 — сетка

метрии, гравиметрии, спектроскопии, фотометрии, гониометрии, микроскопии и т. д. Данные об окулярах некоторых зрительных труб приведены в табл. III в приложении.

## § 55. ЛУПА И МИКРОСКОП

Оптическая система, предназначенная для наблюдения близко расположенных предметов в увеличенном виде, называется *микроскопом*. Простейшим микроскопом является *лупа*. Каждая лупа характеризуется: 1) видимым увеличением  $\bar{\Gamma}$ , 2) полем зрения  $2l$ .

Схема действия лупы показана на рис. 90. Предмет  $2l$  размещается в переднем фокусе лупы. Зрачок глаза  $D_r$  наблюдателя размещается в выходном зрачке лупы. Наблюдатель видит изображение под углом  $\omega'$ , но не на бесконечности, а на расстоянии наилучшего зрения — 250 мм, что объясняется психологией восприятия.

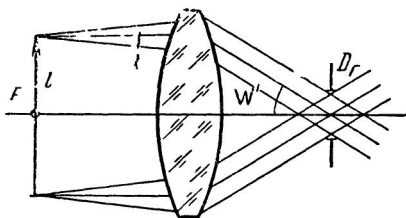


Рис. 90. Лупа

Под видимым увеличением лупы понимают отношение видимого размера изображения к видимому размеру предмета. А так как  $i' = 250 \operatorname{tg} \omega'$ , а  $l = f \operatorname{tg} \omega'$ , то

$$\bar{\Gamma} = \frac{250}{f} \cdot \quad (55,1)$$

Величину  $\bar{\Gamma}$  принято называть окулярным увеличением.

Поле зрения лупы ограничивается aberrациями и ее диаметром.

Из практики применения луп можно указать эмпирическую зависимость между полем зрения и видимым увеличением (в миллиметрах):

$$2l = \frac{150}{\bar{\Gamma}} \cdot \quad (55,2)$$

Световой диаметр лупы  $D_{св}$  определяется размером поля зрения. Как следует из рис. 90:

$$D_{св} = 2l + D_r \cdot \quad (55,3)$$

Плоско-выпуклая линза, обращенная плоской стороной к глазу, может служить лупой с увеличением не свыше  $4^x$ . Такая лупа часто применяется для отсчета по шкалам. Лупы  $6^x$ ,  $10^x$  и  $12^x$  обычно состоят из трех склеенных линз. Такая лупа называется *атлантической*. Конструктивные данные атлантической лупы  $6^x$  приведены ниже:

$$\begin{array}{lll}
 r_1 = 32,7 \text{ мм} & d_1 = 2,5 \text{ мм}, & \Phi 1 \text{ Полный } \varnothing 25 \text{ мм} \\
 r_2 = 16,35 \text{ мм} & d_2 = 11 \text{ мм}, & \text{К8} \\
 r_3 = -16,35 \text{ мм} & d_3 = 2,5 \text{ мм}, & \Phi 1 \text{ Световой } \varnothing 23 \text{ мм} \\
 r_4 = -32,7 \text{ мм} & & 
 \end{array}$$

Лупы  $20\times$  изготавливаются из четырех стекол, склеенных между собой. Они применяются редко из-за малого поля зрения и малого расстояния между предметом и лупой. Для увеличения свыше  $12\times$  применяют микроскоп.

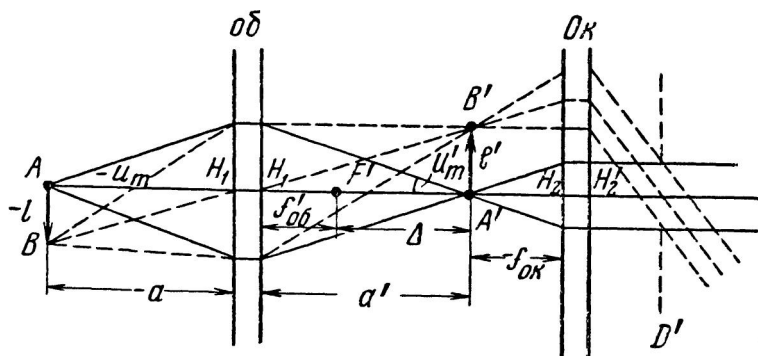


Рис. 91. Оптическая схема тубуса микроскопа

Микроскоп является сложной оптической системой, состоящей, как минимум, из объектива и окуляра. Объектив (рис. 91) проектирует изображение в переднюю фокальную плоскость окуляра. В этой плоскости создается промежуточное действительное обратное изображение рассматриваемого предмета, позволяющее совместить с ним какую-либо шкалу или сетку. Шкала (сетка) видна одновременно с рассматриваемым предметом (отсчетный, шкаловой, измерительный микроскопы). При создании микроскопов выходящие пучки лучей из окуляра микроскопа рассматривают как параллельные.

Существует общераспространенное мнение, что изображение располагается на расстоянии  $250 \text{ мм}$  от наблюдателя, для чего теоретически передний фокус окуляра не должен совпадать с плоскостью изображения, образованного объективом. Действительно, при наблюдении в микроскоп изображение кажется расположенным впереди на расстоянии  $250\text{—}300 \text{ мм}$ , однако это впечатление относится к области психологии восприятия, так как опыт показывает, что наводке в микроскоп на наилучшую резкость изображения соответствует аккомодация для нормального глаза в ноль диоптрий, что в свою очередь означает получение после окуляра параллельных пучков лучей.

Если отдельно выполнить наводку на резкость в микроскоп и в зрительную трубу на бесконечно удаленные предметы и приставить затем последнюю объективом к окуляру микроскопа, то увидим резкие изображения, и они снова будут казаться как бы находящимися перед наблюдателем. Поэтому при создании оптических приборов типа микроскопа (стереометры, компараторы и т. п.) плоскость изображения после всей предшествующей окуляру оптической системы совмещают с передней фокальной плоскостью окуляра.

Зрачок входа на рис. 91 совпадает с объективом. В действительности в микроскопах зрачок входа может быть и перед объективом и позади его.

Микроскоп характеризуется: 1) видимым увеличением  $\Gamma$ , 2) полем зрения  $2l$ , 3) апертурой  $A$ .

Объектив с линейным увеличением  $\beta$  образует действительное изображение величиной  $2l'$ . Это изображение рассматривается при помощи окуляра, работающего подобно лупе, с определенным увеличением. Следовательно, видимое увеличение микроскопа равняется произведению видимого увеличения окуляра на линейное увеличение объектива

$$\Gamma = \beta \bar{\Gamma}. \quad (55,3)$$

Подставляя в это уравнение выражение (55,1), получим

$$\Gamma = \frac{250\beta}{f'_{ок}}. \quad (55,4)$$

Рассматривая микроскоп в целом как лупу, найдем фокусное расстояние микроскопа по формуле (55,1)

$$f'_m = \frac{250}{\Gamma}. \quad (55,5)$$

а отсюда следует, что

$$f'_m = \frac{f'_{ок}}{\beta}. \quad (55,6)$$

Поле зрения микроскопа, как и в случае зрительной трубы, ограничивается полем зрения окуляра. Величина изображения

$$l' = f'_{ок} \operatorname{tg} \omega',$$

где  $\omega'$  — наиболее допустимый угол в пространстве изображений, но  $l' = \beta l$ . Тогда, приравнявая и заменяя отношение  $f'_{ок}/\beta$  по уравнению (55,4), получим

$$2l = \frac{500 \operatorname{tg} \omega'}{\Gamma}. \quad (55,7)$$

Апертура характеризует светосилу микроскопа и его разрешающую способность. Под *числовой апертурой* понимают произведение показателя преломления среды, в которой помещен предмет, на синус апертурного угла

$$A = n_1 \sin u_m. \quad (55,8)$$

Из рисунка 91 можно установить зависимость между апертурой, диаметром выходного зрачка и видимым увеличением. Положим  $n_1=1$  и  $u_m=A$ . Согласно уравнениям (15,1) и (15,2) между углами  $u_m$  и  $u'_m$  имеется зависимость через линейное увеличение объектива, а радиус выходного зрачка равен произведению фокусного расстояния окуляра на апертурный угол в пространстве между объективом и окуляром, т. е.

$$u_m = \beta u'_m, \quad D' = 2u'_m f_{\text{оп}}.$$

Решив эти уравнения и заменив  $\beta/f'_{\text{оп}}$  из уравнения (55,4), получим

$$D' = \frac{500A}{\Gamma}. \quad (55,9)$$

Оптическая среда, которая заполняет пространство между наблюдаемым предметом и объективом, называется *иммерсией*. В качестве иммерсии применяют воду, глицерин, можжевельное масло или монобромнафталин.

Предмет устанавливается на предметное стекло микроскопа (рис. 92, а) и сверху закрывается покровным стеклом. Рассматриваемый предмет плавает в жидкости, а пространство между покровным стеклом и фронтальной линзой объектива микроскопа также заполнено жидкой средой с показателем преломления, близким к показателю стекла.

В этом случае лучи при выходе из покровного стекла не претерпевают полного внутреннего отражения, а проходят в объектив (рис. 92, б). В формуле апертуры (55,8)  $n_1$  и есть показатель преломления иммерсии

Дифракционная теория образования изображения в микроскопе позволяет указать пределы разрешения

предметов, расположенных на конечном расстоянии от оптической системы. Л. И. Мандельштам показал, что в большинстве случаев условия разрешения самосветящихся предметов аналогичны равномерно освещенным\*.

\* См Г. С Ландсберг. Оптика М—Л, Гостехиздат, 1947, стр 200.

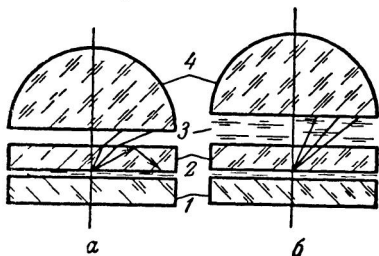


Рис 92 Роль иммерсии в микроскопе 1—предметное стекло, 2—покровное стекло, 3—иммерсия, 4—фронтальная линза микрообъектива

Наименьший предмет или деталь объекта, разрешаемые в микроскопе, определяются уравнением

$$\delta = \frac{\lambda}{2A}. \quad (55,10)$$

Разрешающая способность оптической системы типа микроскопа пропорциональна апертуре  $A$ .

Апертура микроскопа позволяет определить ожидаемую разрешающую способность по формуле (55,10). Наибольшая достигнутая величина апертуры составляет  $A=1,6$ , что при наблюдении в видимых лучах спектра ( $\lambda=0,55$  мкм) позволяет получить предельно маленькое расстояние между двумя рассматриваемыми точками в 0,17 мкм. Чтобы раздельно рассмотреть такие точки, необходимо обеспечить соответствующее видимое увеличение микроскопа, называемое *полезным*. Оно учитывает разрешающую силу глаза от  $2'$  до  $4'$  и определяется выражением

$$500A < \Gamma_n < 1000A. \quad (55,11)$$

Таким образом, разумный предел наибольшего увеличения микроскопа при  $A=1,6$  составляет  $1600\times$ . В практике большей частью создают микроскопы, позволяющие получать увеличение до  $1350\times$ . В особых случаях оно достигает  $3500\times$ .

Для измерительных микроскопов принимают разрешающую силу глаза в 60 сек. Тогда формула, полезного увеличения принимает вид

$$\Gamma_n = 270A. \quad (55,12)$$

Длина микроскопа  $L$  главным образом зависит от фокусного расстояния объектива:

$$L = a' + f'_{ок}. \quad (55,13)$$

Величины  $a$  и  $a'$  связаны уравнением линейного увеличения, а с фокусным расстоянием объектива — через уравнение отрезков (44,9). Большое фокусное расстояние объектива приводит к громоздким конструкциям, а малое — к трудностям достижения удовлетворительной абберационной коррекции для сравнительно большого поля зрения.

Опыт многих лет показал, что так называемая механическая длина тубуса микроскопа должна быть в пределах от 160 до 190 мм. *Механической длиной тубуса* называется расстояние между опорными плоскостями: с одной стороны (снизу), оправой объектива, а с другой стороны (сверху), оправой окуляра. Стандартизация этого размера в отечественных микроскопах в 160 мм позволяет широко применять взаимную замену объективов и окуляров одних другими, учитывая также взаимозаменяемость резьб оправ объективов и диаметров окуляров, обычно вкладываемых в тубус микроскопа.

Микроскоп имеет сложную оптическую систему, разделяющуюся как бы на две части — осветительную и наблюдательную. Обычно под собственно микроскопом понимают наблюдательную систему, состоящую из объектива и окуляра, и оптические характеристики микроскопа относятся именно к этой части микроскопа.

Конструкции осветительных устройств, предназначенных для освещения прозрачных и непрозрачных предметов, различны. Оптическая схема микроскопа, состоящая из тонких компонентов, применяемая при рассмотрении прозрачных предметов, показана на рис. 93.

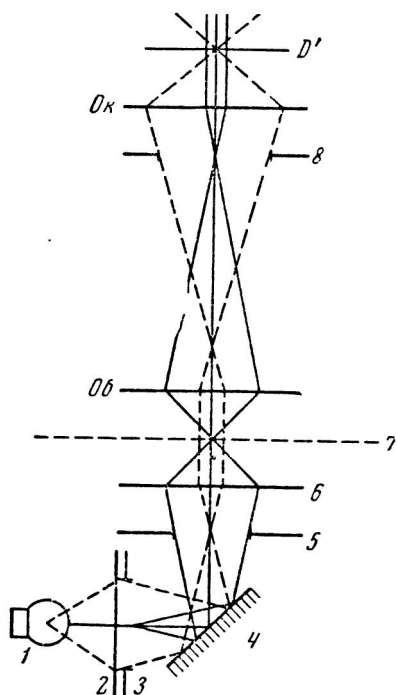


Рис. 93. Оптическая схема микроскопа: 1 — источник света; 2 — конденсор I; 3 — диафрагма I; 4 — зеркало; 5 — диафрагма II; 6 — конденсор II; 7 — плоскость предметов; 8 — диафрагма поля зрения

Одновременно конденсор II проектирует отверстие ирисовой диафрагмы II в бесконечность. При таком способе освещения поле зрения микроскопа равномерно освещено, а вредный рассеянный свет может быть срезан ограничением отверстия диафрагмы I. Изменением же отверстия в диафрагме II можно влиять на размер апертурного угла микрообъектива, что также помогает устранить лишний рассеянный свет.

Зеркало с внутренним серебрением имеет две стороны, на одной из них — плоская отражающая поверхность, а на другой — вогнутая. Вогнутое зеркало применяется в микроскопах слабого увеличения без конденсора, а плоское — вместе с конденсором. Эти конденсоры, расположенные под предметным столиком микроскопа,

Оптика микроскопа состоит из источника света, конденсора I, зеркала, конденсора II, объектива и окуляра. Следует иметь в виду, что источник света, конденсор I и ирисовая диафрагма I конструктивно отделены от микроскопа и представляют собой как бы самостоятельный прибор, называемый осветителем, подсоединяемый к микроскопу при наблюдении. Показанная на рис. 93 схема освещения предмета является наилучшей и называется *системой Келера*. Источник света проектируется конденсором I в плоскость диафрагмы II, которая расположена в точке переднего фокуса конденсора II. Сзади конденсора I находится ирисовая диафрагма I. Эта диафрагма проектируется конденсором II в плоскость рассматриваемых предметов.



применяются в микроскопах сильного увеличения, с апертурой более 0,65, и бывают неахроматические и ахроматические (рис. 94).

Для освещения непрозрачных предметов служат опак-иллюминаторы различных систем. Они направляют свет сверху на рассматриваемый предмет. Например, свет направляется от лампочки, размещенной сбоку тубуса, на стеклянную пластинку, установленную между объективом и окуляром, под углом  $45^\circ$  к оптической оси микроскопа (система Бека). Часть света отражается от поверхности пластинки и проходит через объектив.

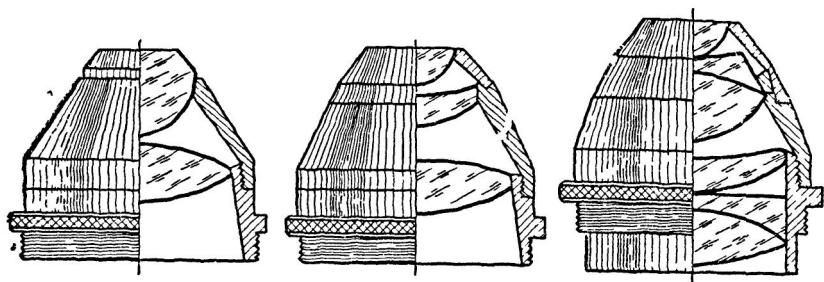


Рис. 94. Конденсоры микроскопа

В ряде микроскопов в последнее время стали применяться двухобъективные системы (рис. 95) с параллельным ходом лучей между ними. В этом случае рассматриваемый предмет размещается в передней фокальной плоскости объектива, а его изображение

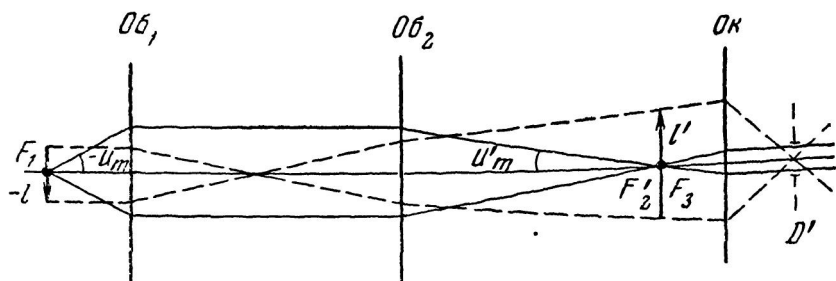


Рис. 95. Двухобъективная система тубуса микроскопа

после второго объектива получается в задней фокальной плоскости второго объектива, совмещенной с передней фокальной плоскостью окуляра. Здесь длина механического тубуса имеет второстепенное значение, а параллельный ход лучей между объективами позволяет легко осуществить ввод пучков лучей от осветителя для освещения непрозрачных предметов (рис. 96).

Объективы микроскопа с увеличением до  $\beta = -6$  обычно состоят из двух склеенных линз. Апертура таких объективов не свы-

ше 0,15. Объектив микроскопа в виде двух двухлинзовых склеенных объективов применяется в случае увеличения объектива от 6 до 10. Объективы обозначаются через произведение числа линейного увеличения на апертуру, например  $6 \times 0,17$ ;  $8 \times 0,20$ ;  $10 \times 0,25$ .

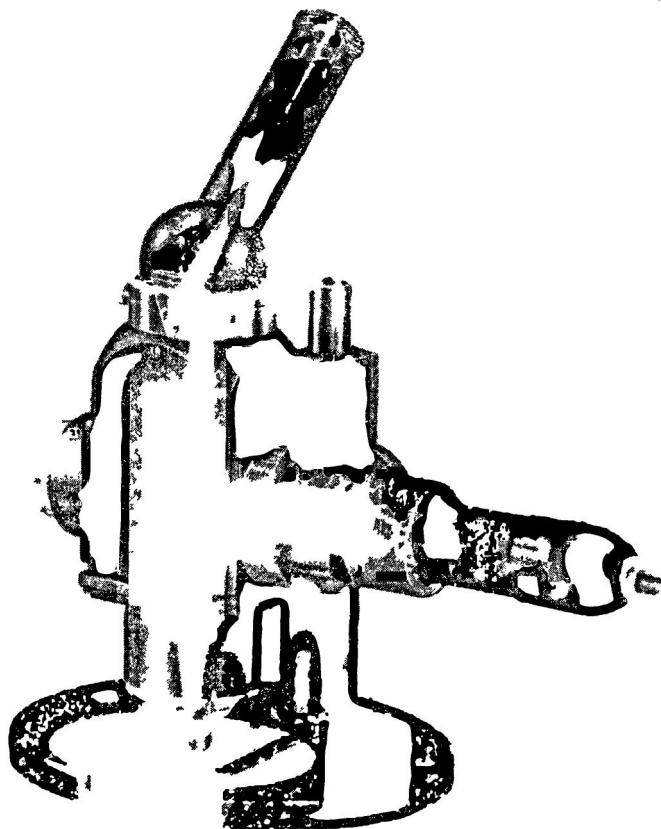


Рис 96 Микроскоп для наблюдения непрозрачных предметов

Достигнуть большего увеличения при хорошем качестве изображения удастся только за счет усложнения конструкции. Конструкции современных микрообъективов показаны на рис. 97

В качестве окуляров микроскопа наиболее часто применяют окуляры типа Гюйгенса (см. рис 82). В отдельных случаях применяют так называемые компенсационные окуляры типа Кельнера, которые частично компенсируют хроматизм увеличения объектива.

Микроскопы обычно снабжаются сменными объективами и окулярами. Например, биологический микроскоп имеет объективы  $8\times$ ,  $40\times$  и  $90\times$  и окуляры  $7\times$ ,  $10\times$  и  $15\times$ . Такой микроскоп позволяет получать различные увеличения от  $56\times$  до  $1350\times$ . Вид микроскопа в разрезе показан на рис. 98.

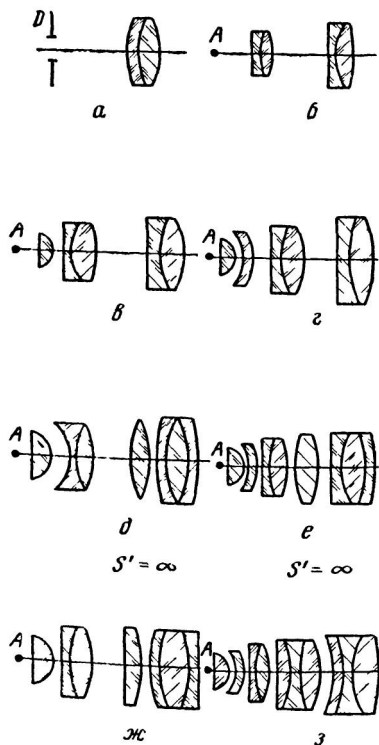


Рис. 97 Микрообъективы: а — от  $1\times 0,0016$  до  $6\times 0,18$ , б — от  $7\times 0,17$  до  $10\times 0,25$ ; в — от  $10\times 0,3$  до  $70\times 0,8$ , г — от  $20\times 0,7$  до  $40\times 0,75$ , 95 $\times 1,25$ ; д —  $20\times 0,65$  (апохромат); е —  $90\times 1,35$ ; ж —  $30\times 0,65$ , з —  $90\times 1,3$

тивов и окуляров микроскопов приведены в табл. IV и V в приложении.

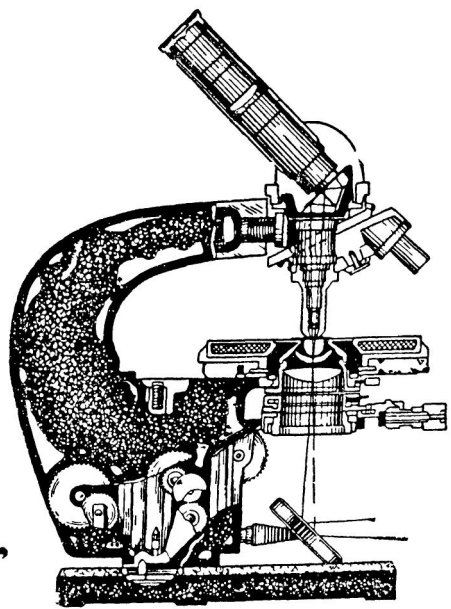


Рис 98 Биологический микроскоп

К оптической системе микроскопа относятся не только собственно микроскопы, биологические, отсчетные, поляризационные и т. п. К таким системам относятся вообще все визуальные оптические приборы, предназначенные для рассмотрения близко расположенных предметов — компараторы, стереометры и т. п. Данные для некоторых микрообъек-

### § 56. ФОТОГРАФИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТИВ

Фотографическим объективом называется оптическая система, образующая действительное изображение, фиксируемое каким-либо светочувствительным слоем. Развитие фотохимии обусловило появление оптических систем, предназначенных для фотографиче-

ских съемок в различных лучах спектра. Широкое внедрение методов фотографии в различные отрасли науки и техники потребовало создания различных оптических систем для этой цели.

Оптическая схема фотографического объектива показана на рис. 99.

В большинстве случаев изображение должно образовываться на плоскости, так как фотографические пластинки или пленки имеют плоскую форму. Но иногда объектив образует изображение на шаровой поверхности, цилиндрической или криволинейной. В этих случаях светочувствительному слою необходимо придавать такую же форму.

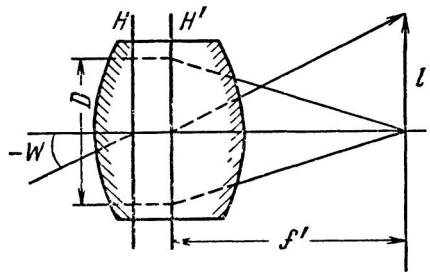


Рис. 99. Фотографический объектив

Фотографические объективы обычно имеют плоское поле изображения, большую светосилу и большое поле зрения. Простая оптическая система в виде двухлинзового объектива не может образовать такое изображение достаточно высокого качества. Поэтому фотографические объективы состоят из нескольких линз. Наиболее часто встречаются четырех- и шестилинзовые объективы.

Основными оптическими характеристиками фотографического объектива являются: 1) фокусное расстояние,  $f'$ , 2) относительное отверстие,  $1:n$ , 3) поле зрения,  $2w$ .

Если объектив предназначен для фотографирования близко расположенных предметов, то к числу его основных характеристик также относится линейное увеличение (или масштаб съемки)  $\beta$ . Дополнительными характеристиками объектива являются: 1) разрешающая способность, 2) интегральный коэффициент пропускания света, 3) коэффициент светорассеяния, 4) контраст изображения, 5) распределение освещенности по полю изображения, 6) спектральная характеристика пропускания света, 7) состояние абберационной коррекции (ахроматизация, ортоскопичность) и др.

В зависимости от условий эксплуатации все фотографические объективы можно разбить на группы: 1) объективы для художественной фотографии, 2) аэрофотосъемочные, 3) кино съемочные, 4) инфракрасные, 5) ультрафиолетовые, 6) рентгеновские, 7) микрофотографические; 8) репродукционные\*, 9) регистрационные, 10) телевизионные, 11) гидросъемочные, 12) астрофотографические и др. Фотографические объективы по принципу устройства разделяются на: 1) нормальные, 2) телеобъективы, 3) обратные телеобъективы, 4) залинзовые, 5) панкратические, 6) зеркальные, 7) зеркально-линзовые, 8) дисторзирующие, 9) концентрические.

\* Репродукционные объективы относят к фотографическим, так как процесс репродукции, связанный с получением типографских форм печати, относится к фотографии.

Фокусное расстояние и линейное увеличение определяют масштаб изображения. Масштаб находится из отношения фокусного расстояния к расстоянию от объектива до снимаемых предметов. Например, если объектив имеет фокусное расстояние 1 м, а съемка производится с расстояния 10 км, то масштаб изображения 1 : 10 000. При съемках близко расположенных предметов масштаб изображения определяется линейным увеличением.

На практике можно встретить объективы с фокусными расстояниями от нескольких миллиметров до 1800 мм, причем для специальных целей применяют объективы и до  $f' = 8000$  мм.

*Относительное отверстие* объектива характеризует светосилу. В зависимости от величины относительного отверстия объективы разделяются на: 1) ультрасветосильные, от 1 : 1,1 и более (например, 1 : 0,9 и т. д.), 2) светосильные, от 1 : 1,1 до 1 : 3,5, 3) нормальные от 1 : 3,5 до 1 : 6,3 и 4) малосветосильные, менее 1 : 6,3 (например, 1 : 6,8; 1 : 15 и т. п.).

Светосила объектива снижается потерями света. Относительное отверстие объектива, определенное с учетом коэффициента пропускания света, называется *эффективным* и обозначается  $n_s$ ,

$$n_s = \frac{n}{\sqrt{\tau}}. \quad (56,1)$$

Относительные отверстия объективов встречаются от 1 : 0,5 до 1 : 15. Наиболее часто встречаются объективы с относительными отверстиями 1 : 2—1 : 6,3.

*Величина поля зрения* определяет формат изображения. По величине угла поля зрения объективы разделяются на: 1) узкоугольные, с полем зрения не более  $2\omega = 40^\circ$ , 2) нормальные, с полем зрения от  $2\omega = 40^\circ$  до  $2\omega = 65^\circ$ , 3) широкоугольные, с полем зрения от  $2\omega = 65^\circ$  до  $2\omega = 104^\circ$ , 4) сверхширокоугольные, с полем зрения свыше  $2\omega = 104^\circ$ . Величина поля зрения объективов колеблется от  $2\omega = 2^\circ$  до  $2\omega = 210^\circ$ .

*Разрешающая способность* объективов является основным параметром, характеризующим качество изображения. Ее оценивают в линиях (штрихах) на миллиметр. Очевидно, что разрешаемое расстояние в фокальной плоскости равно произведению фокусного расстояния объектива на тангенс разрешаемого угла, определяемого уравнением (40,1):

$$\delta' = f' \operatorname{tg} \psi. \quad (56,2)$$

Учитывая малые значения углов, заменим тангенс на синус, затем, применив формулу (40,1), перейдем к числу линий на миллиметр

$$N = \frac{1}{\delta'} = \frac{D}{1,22\lambda f'}.$$

Учитывая выражение (28,4) и принимая  $\lambda = 0,00056$  мм, полу-

$$N_0 = \frac{1473}{n}, \quad (56,3)$$

т. е. разрешающая способность фотографического объектива зависит от относительного отверстия.

Разрешающая способность, определяемая уравнением (56,3), имеет место при визуальном наблюдении изображения, образованного фотографическим объективом. Обычно фотографическое изображение является результатом воздействия оптического изображения на светочувствительный слой, разрешающая способность которого  $R$  влияет на разрешающую способность системы: объектив+слой. Тогда ожидаемая разрешающая способность при испытании объективов с помощью мир абсолютного контраста определяется формулой

$$\frac{1}{N} = \frac{1}{N_0} + \frac{1}{R}. \quad (56,4)$$

Опыт показывает, что фотографические объективы не достигают и этого предела. Основной причиной являются их аберрации.

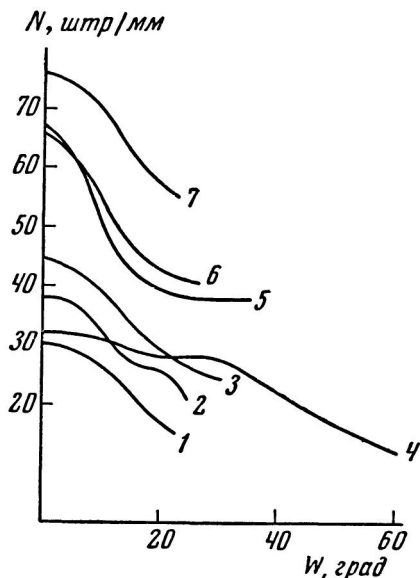


Рис 100. Разрешающая способность различных фотографических объективов: 1—Юпитер 8; 2—Индустар-50; 3—Мир-1; 4—Руссар-30; 5—ОКС1-56; 6—ОКС2-40; 7—ОКС2-15

Характерным недостатком всех объективов является падение разрешающей способности от центра к краю. На рис. 100 показаны характеристические кривые разрешающей способности некоторых фотографических объективов. Наивысшую разрешающую способность: 45÷75 штрихов на миллиметр в центре поля, и около 40 штрихов на краю поля имеют кино-съёмочные объективы. Объективы же для бытовых целей (любительские) обычно имеют разрешающую способность в центре поля 25÷40 штрихов на миллиметр и 10÷15 на краю поля.

Хорошим объективом считается тот, который имеет для края поля разрешающую способность не менее 16 штрихов на миллиметр, а в центре не менее 35 (съёмка на панхроматических эмульсиях со светофильтром). Разрешающая способность в центре поля определяется сферохроматической аберрацией.

В таблицах VI и VII в приложении приводятся основные оптические характеристики некоторых фотографических и аэрофотографических объективов. В таблице VIII представлены характеристики киносъёмочных объективов.

*Коэффициент пропускания света* приобретает важное значение в связи со сложностью объективов. Большие потери света на отражение и поглощение значительно понижают физическую светосилу объектива. Просветление оптики повышает коэффициент светопропускания. Например, объектив «Индустар-4»,  $f' = 210$  мм, до просветления пропускал 72,5% падающего света, а после просветления 84%\*.

*Коэффициент светорассеяния* определяет действие паразитного рассеянного света, не принимающего непосредственного участия в организации оптического изображения, но снижающего контраст изображения. Коэффициентом светорассеяния называется отношение освещенности образуемого объективом изображения черного предмета, расположенного на равномерно ярком фоне, к освещенности изображения фона. В фотографических объективах этот коэффициент достигает значений от 0,6% до 5% и возрастает с уменьшением относительного отверстия объектива и с увеличением угла поля зрения.

*Контраст изображения* определяют в зависимости от частоты штрихов испытательной миры. Эта зависимость называется частотно-контрастной характеристикой. Она определяется коэффициентом передачи контраста  $C$  для определенной частоты штрихов миры

$$C = \frac{K_{\text{изобр}}}{K_{\text{предм}}}$$

где  $K$  — контраст изображения или предмета, определенный по формуле

$$K = \frac{E_{\text{макс}} - E_{\text{мин}}}{E_{\text{макс}} + E_{\text{мин}}}.$$

*Распределение освещенности по полю изображения* зависит от угла поля зрения и виньетирования.

Оптическая плотность фотографического изображения от центра к краю часто падает в 10—20 раз. Кроме действия фактора косинуса угла четвертой степени здесь имеет значение и само геометрическое виньетирование. Для нормальных, по углу зрения, объективов стремятся, чтобы светопропускание наклонных пучков для края поля не было менее 50% осевого пучка, т. е.  $K_w = 0,5$ . Для широкоугольных и сверхширокоугольных объективов необходимо повышать светопропускание. Для сверхширокоугольного объектива «Руссар-29»  $K_w$  достигает 2.

Знание величин аберраций объектива позволяет предопреде-

\* Сб. «Оптика в военном деле». М.—Л., Изд-во АН СССР, 1945, стр. 304.

лить качество изображения и на основании характеристических кривых aberrаций сделать выбор объектива для решения определенных задач

Обычно большое поле зрения и большая светосила создают большие трудности в исправлении aberrации и остаточные aberrации достигают значительной величины. Поэтому aberrации объектива резко снижают теоретическую разрешающую способность. Спектральный состав используемого света определяет вид ахроматизации объектива, а условия использования изображения — ортоскопичность.

Обычно рассматривают 1) вторичный спектр, 2) сферические aberrации различных лучей спектра, 3) астигматизм, 4) aberrации наклонных лучей различных лучей спектра, 5) дисторсию.

Характеристические кривые aberrаций полиграфического репродукционного объектива «Полигмар»,  $f' = 600$  мм, показаны на рис 101.

Особое значение имеет дисторсия для объективов, предназначенных для измерительных целей. Таковыми, например, являются аэрофотосъемочные картографические объективы. Для этих объективов дисторсия не должна превосходить 0,01—0,05 мм.

Тип объектива определяется формой линз, их числом и взаимным расположением друг по отношению к другу. Различные типы фотографических объективов показаны на рис 102.

Четырехлинзовые объективы типа «Тессар» (рис 102) широко применяются в Советском Союзе и известны под названием «Индустар» (И-11, И-23, И-50, И-51, И-60 и др.)

Объективы этого типа позволяют получить поле зрения не более  $2\omega = 63^\circ$ . Для них является характерным резкое падение разрешающей способности от центра к краю — 30 штрихов на миллиметр в центре и 5—10 с краю.

Особое место среди фотографических объективов занимают телеобъективы. Они отличаются тем, что их общая длина  $L$  от первой поверхности до фокальной плоскости короче фокусного расстояния  $f'$ . Это достигается тем, что объектив составляется из двух компонентов, из которых задний имеет отрицательное фокусное расстояние. Степень укорочения будем характеризовать коэффициентом телеобъектива  $k_t$ :

$$k_t = \frac{L}{f'} . \quad (56,5)$$

Оптическая схема телеобъектива, составленного из бесконечно тонких компонентов, показана на рис 103. Установим зависимость между оптическими силами компонентов  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , расстоянием между компонентами  $d$  и коэффициентом телеобъектива  $k_t$ . Применяя известные формулы углов (48,3) и высот (48,4) и полагая  $h_1 = 1$ ,  $\alpha_1 = 0$  и  $\alpha_3 = 1$ , получим

$$\alpha_2 = \Phi_1,$$



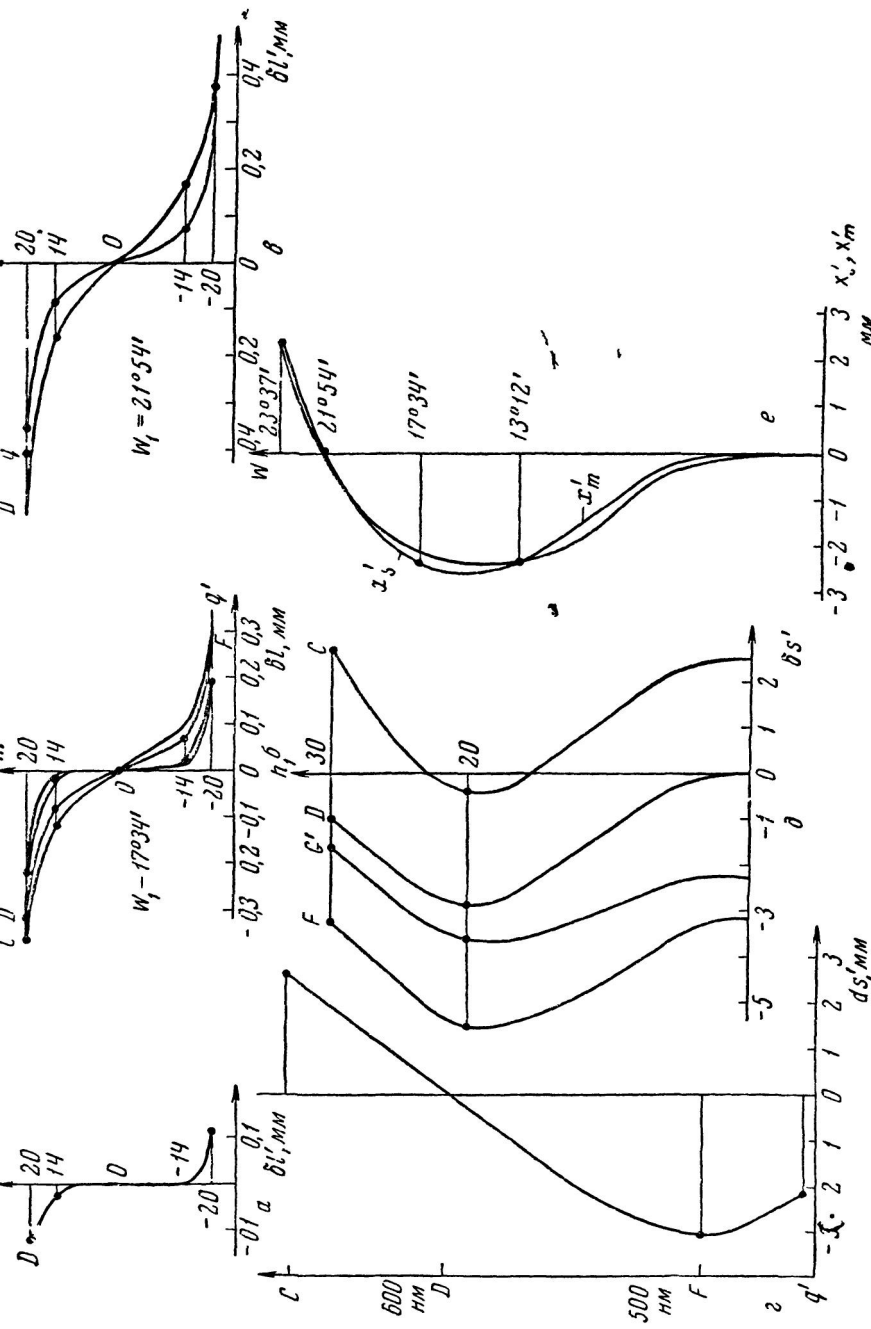


Рис 101 Аберрация репродукционного объектива «Полигмар»  $f' = 60$  см, 1 10,  $2\omega = 45^\circ$ , 1 1 ( $\beta = -1$ )  
 а, б, в — аберрация пачковых лучей, г — вторичный спектр, д — вторичный спектр, е — астигматизм, е — астигматизм

Из формулы суммы оптических сил (49,5) при  $f' = 1$  имеем

$$\Phi_1 = \frac{1 - \Phi_2}{1 - d\Phi_2}. \quad (56,7)$$

Уравнение (56,7) подставим в (56,6), тогда получим

$$k_t - d = \frac{1 - d\Phi_2 - (1 - \Phi_2)d}{1 - d\Phi_2},$$

откуда

$$\Phi_2 = \frac{1 - k_t}{d^2 - dk_t}. \quad (56,8)$$

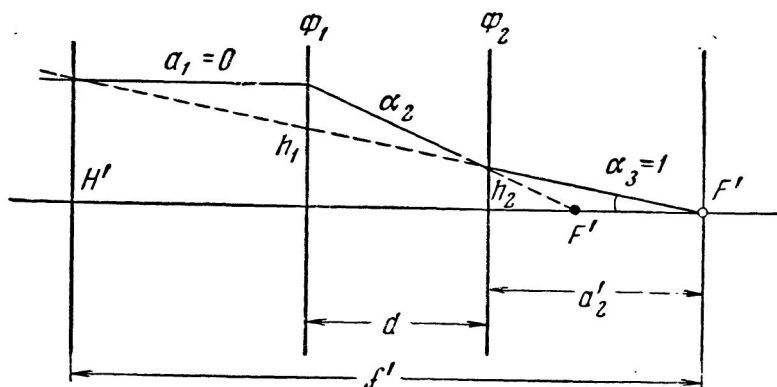


Рис. 103. Оптическая схема телеобъектива

Среди телеобъективов наибольшее распространение получили четырехлинзовые объективы типа «Теликон», известные под названием «Телемар».

В пределах данного типа различные объективы могут отличаться конструктивными элементами. Конструкция объектива определяется четырьмя параметрами: 1) радиусами кривизны преломляющих поверхностей, 2) толщинами линз, 3) расстояниями между линзами, 4) марками стекол линз. В зависимости от определенной конструкции объектив отличается тем или иным качеством изображения. Тип объектива обуславливает возможности его в части достижения определенного поля зрения и светосилы.

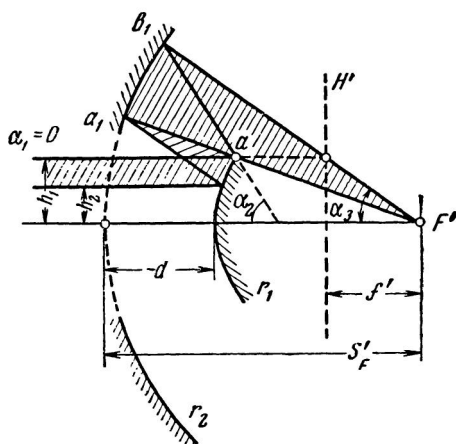


Рис. 104. Сложная зеркальная система

Из формулы суммы оптических сил (49,5) при  $f'=1$  имеем

$$\Phi_1 = \frac{1 - \Phi_2}{1 - d\Phi_2}. \quad (56,7)$$

Уравнение (56,7) подставим в (56,6), тогда получим

$$k_t - d = \frac{1 - d\Phi_2 - (1 - \Phi_2)d}{1 - d\Phi_2},$$

откуда

$$\Phi_2 = \frac{1 - k_t}{d^2 - dk_t}. \quad (56,8)$$

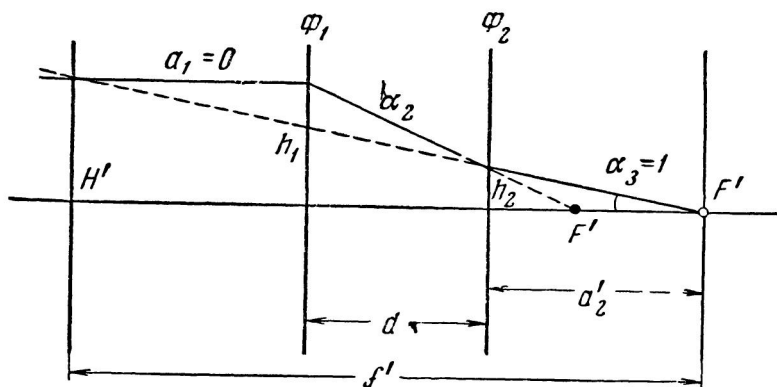


Рис 103 Оптическая схема телеобъектива

Среди телеобъективов наибольшее распространение получили четырехлинзовые объективы типа «Теликон», известные под названием «Телемар».

В пределах данного типа различные объективы могут отличаться конструктивными элементами. Конструкция объектива определяется четырьмя параметрами: 1) радиусами кривизны преломляющих поверхностей, 2) толщинами линз, 3) расстояниями между линзами, 4) марками стекол линз. В зависимости от определенной конструкции объектив отличается тем или иным качеством изображения. Тип объектива обуславливает возможности его в части достижения определенного поля зрения и светосилы.

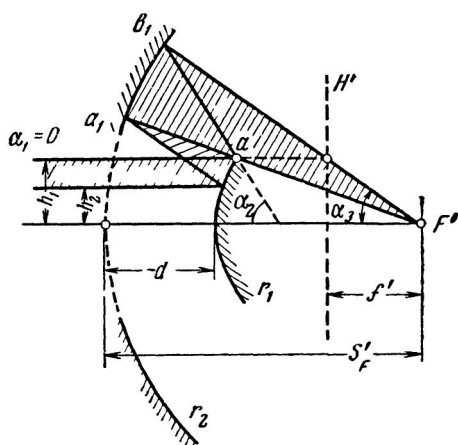


Рис 104 Сложная зеркальная система

Оптические системы, состоящие из сферических отражающих поверхностей, имеют преимущество перед системами из преломляющих поверхностей в том, что в первых отсутствует хроматическая aberrация и поглощение света стеклом. В последнее время находят значительное распространение сложные зеркальные системы из двух сферических зеркал. Такие системы применяются в качестве объективов и специальных осветительных систем.

Система состоит из двух сферических зеркал (рис. 104), обращенных выпуклостями в одну сторону. Параллельный пучок света имеет вид кольца. Первое выпуклое (рассеивающее) зеркало с радиусом кривизны  $r_1$  направляет часть пучка  $ab$  на второе вогнутое (собирающее) зеркало с радиусом кривизны  $r_2$ . Второе зеркало в плоскости чертежа имеет размер  $a_1b_1$ . На рис. 104 показан только параллельный пучок лучей. Наклонный пучок увеличит размеры второго зеркала.

Конструктивные данные двухзеркальной системы зависят от принятых значений:  $f'$ ,  $s'_F$  и  $d$ . Допустим, что из пространства предметов луч идет под углом  $\alpha_1=0$ , между зеркалами под углом  $\alpha_2$ , а в пространстве изображений  $\alpha_3=1$ . Тогда при  $f'=1$  и  $h_1=1$ ,  $h_2=s'_F$ , и на основании формулы (48,4) можем записать

$$d_2 = \frac{1 - s'_F}{d}. \quad (56,10)$$

Использование же формулы (13,16) при  $n_1=1$ ;  $n_2=-1$  и  $n_3=1$  даст

$$r_1 = \frac{2}{\alpha_2} \quad (56,11)$$

и

$$r_2 = \frac{2s'_F}{1 + \alpha_2}. \quad (56,12)$$

Так, например, если  $f'=62,5$ ,  $s'_F=175$  мм и  $d=-45$  мм, при  $f'=1$ , соответственно будем иметь  $s'_F=2,8$  и  $d=-0,72$ . Тогда использование формул (56,10), (56,11) и (56,12) даст  $r_1=0,8$  и  $r_2=1,6$ , что на  $f'=62,5$  мм дает  $r_1=50$  мм и  $r_2=100$  мм.

Так как отрезок  $s'_F$  показывает положение точки фокуса и является конструктивным параметром, то воздушный промежуток  $d$  может быть использован как aberrационный параметр.

Если же заданы конструктивные параметры двухзеркальной системы:  $r_1$ ,  $r_2$  и  $d$ , то фокусное расстояние может быть найдено по формуле оптической силы двух линз (49,5).

Учитывая, что оптическая сила каждого зеркала равна  $\Phi=2/r$ , получим

$$f' = \frac{r_1 r_2}{2(r_1 - r_2 - 2d)}. \quad (56,13)$$

Положение точки фокуса  $F'$  от зеркала с радиусом кривизны  $r$  может быть найдено по известной формуле зеркала

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{r}. \quad (56,14)$$

Если предмет расположен в бесконечности, т. е.  $s_1 = -\infty$ , то  $s_1' = r_1/2$ , тогда  $s_2 = \frac{r_1}{2} - d$  и искомая величина  $s_2'$  найдется после преобразований по формуле

$$s_2' = \frac{r_2(r_1 - 2d)}{2(r_1 - r_2 - 2d)}. \quad (56,15)$$

Например, если  $r_1 = 50$  мм,  $r_2 = 100$  мм и  $d = -45$  мм, получим  $f' = +62,5$  мм и  $s_2' = 175$ .

Если предмет находится на конечном расстоянии от системы, то величина  $s_2'$  находится по формуле отрезков, последовательно примененной к обеим поверхностям. Например, если задано положение предмета  $s_1$ , то

$$s_2' = \frac{r_2[r_1 s_1 - d(2s_1 - r_1)]}{2s_1(r_1 - r_2) + r_1 r_2 - 2d(2s_1 - r_1)}. \quad (56,16)$$

Так, если  $s_1 = -100$ , то  $s_2' = 216,6$  мм.

При определении относительного отверстия такой зеркальной системы учитывается кольцеобразная форма входного зрачка. Площадь входного зрачка находится по формуле

$$S = \pi(h_1^2 - h_2^2). \quad (56,17)$$

Приводя это выражение к площади круглого зрачка, найдем радиус условного зрачка входа

$$\frac{D_3}{2} = \sqrt{h_1^2 - h_2^2}. \quad (56,18)$$

Такие системы отличаются большой светосилой. Они находят себе применение в тех случаях, когда необходимы относительные отверстия  $1 : 0,5 - 1 : 2$ .

Зеркальные системы имеют значительную остаточную сферическую аберрацию. Но сочетание отражающих и преломляющих поверхностей позволяет создать оптическую систему с высоким качеством изображения. Такие системы получили наименование зеркально-линзовых объективов. Современный зеркально-линзовый объектив состоит из трех частей: линзового компенсатора (*I*), зеркальной системы (*II*) и дополнительного двухлинзового склеенного объектива (*III*) (рис. 105).

Данные о некоторых зеркально-линзовых объективах собраны в табл. IX в приложении.

Известны компенсаторы различных конструкций (рис. 106).

В Советском Союзе большей частью применяется компенсатор в виде менисковой линзы, использование которой в известной астрономической зеркальной системе Кассегрена позволило создать новый тип фотографического объектива — зеркально-линзового менискового объектива.

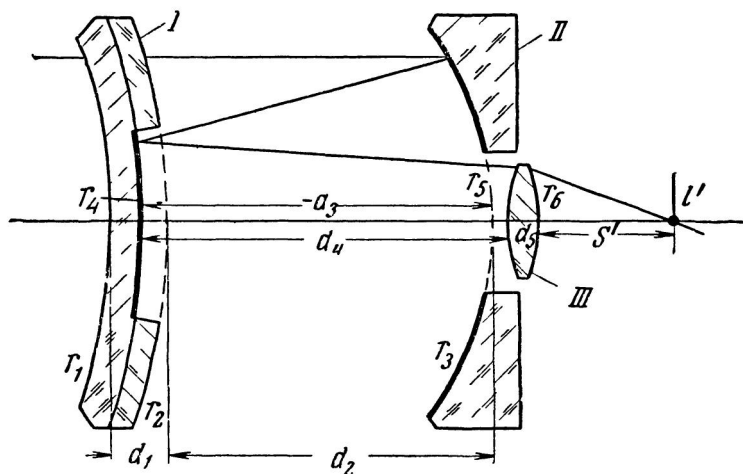


Рис. 105 Упрощенная схема зеркально-линзового объектива

В настоящее время во многих отраслях техники, в фотографии, кинематографии, астрономии, геодезии, военной оптике находят себе применение подобные объективы.

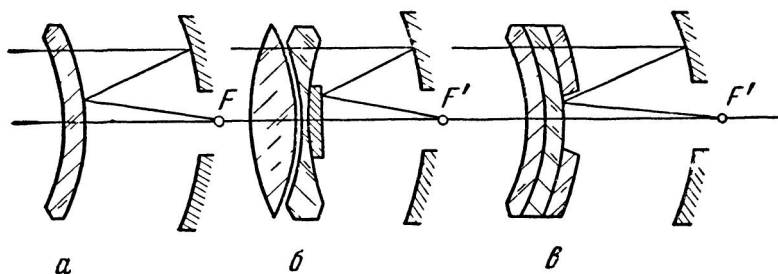


Рис 106 Зеркально-линзовые системы с различными компенсаторами

Расщепление мениска Максутова на две линзы с воздушной прослойкой между ними создало афокальный компенсатор нового типа (Волосов, Гальперн и Печатникова, 1945 г.). Превращение менисковой одиночной линзы в двухлинзовую ахроматическую систему позволило получить еще лучшую коррекцию хроматических aberrаций (Бегунов и Новик, 1952 г.) и осуществить кино съемочный объектив с  $f' = 500$  мм с высокой разрешающей способностью.

В приложении в табл. X и XI приводятся некоторые данные об объективах, нашедших применение в телевидении и репродукционной фотографии. Панкратические объективы, позволяющие плавно изменять фокусное расстояние в 3—6 раз, также относятся к разряду фотографических.

### § 57. ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Осветительные системы служат для освещения предмета, рассматриваемого или проектируемого с помощью оптического прибора. Они должны позволить наилучшим образом использовать

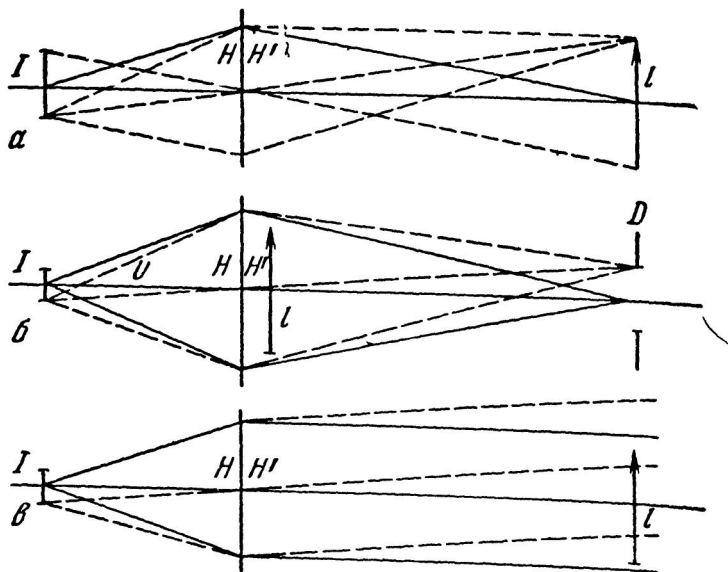


Рис. 107. Схемы освещения конденсором  $HH'$  предмета  $I$ ,  $I$  — источник света

световой поток, даваемый источником света, для достижения наибольшей освещенности и получить равномерную освещенность изображения. Осветительные системы бывают линзовые, зеркальные и зеркально-линзовые.

Конденсором называется линза или система линз, предназначенная для освещения предмета. Она сама не образует изображение этого предмета. Но так как изображение образуется с лучами, прошедшими через конденсор, и только этими лучами, то конденсор приобретает важное значение в общем образовании изображения последующей оптической системы. Встречаются три схемы применения конденсора:

1. Конденсор  $HH'$  проектирует изображение источника света в плоскость предмета (рис. 107, а). В этом случае изображение

источника света совмещается с самим предметом. Примерами такого освещения являются кинопроекторные аппараты и спектральные приборы.

2. Конденсор  $HH'$  проектирует изображение источника света во входной зрачок объектива последующей оптической системы (рис. 107, б). В этом случае освещенный предмет располагается как можно ближе к конденсору. Примерами такого освещения являются диапроекторы, трансформаторы, спектральные приборы. Этот вид освещения является наиболее распространенным.

3. Конденсор  $HH'$  проектирует изображение источника света в бесконечность (рис. 107, в). Примерами такого освещения являются прожекторы и коллиматоры фотореле.

Оптическими характеристиками конденсора являются: 1) фокусное расстояние,  $f'$ , 2) линейное увеличение,  $\beta$ , 3) относительное отверстие,  $1:n$ , 4) угол охвата,  $2u$ , 5) угол сходимости,  $\omega$ .

*Углом охвата* в пространстве предметов называется плоский угол в главном сечении, соответствующий телесному углу охвата оптической системы. Этому углу соответствует двойной апертурный угол в пространстве предметов. Представим апертурный угол в виде выражения

$$\operatorname{tg} u = \frac{D}{2a},$$

в котором диаметр входного зрачка  $D$  выразим через диафрагменное число  $n$  по формуле (28,4), а передний отрезок  $a$  — через линейное увеличение по формуле (44,11). Тогда получим

$$\operatorname{tg} u = -\frac{\beta}{2(1-\beta)n}. \quad (57,1)$$

Чем больше угол охвата, тем больше светового потока использует ся от источника света.

*Углом сходимости* называется плоский угол в пространстве изображений, сопряженный с углом охвата. Иногда этот угол называют углом конденсора, так как его величина в некоторых случаях должна соответствовать угловому полю зрения проекционного объектива.

При освещении предмета по первой схеме, т. е. так, чтобы изображение источника света совмещалось с самим предметом, необходимо, чтобы источник света был достаточного размера. Необходимо, чтобы изображение источника света было несколько больше самого предмета. Очевидно, что точечные источники света непригодны. Здесь находят себе применение вольтовы дуги и кинопроекторные лампы, имеющие световое тело накала в виде прямоугольной системы ряда нитей (например, электролампы К12, К15, К22).

Расположение изображения источника света в плоскости предмета или вблизи него вызывает сильный нагрев проектируе-



мого предмета Применение теплофильтров снижает нагрев, но не исключает его Вследствие этого становится невозможным применение таких систем освещения для рассматривания неподвижных негативов, диапозитивов, спектрограмм и т. п., так как нагрев испортит слой эмульсии В кинопроекторных аппаратах имеет место быстрое чередование кадров, поэтому отдельный кадр не успевает нагреться до опасного предела При освещении металлических щелей в приборах также нет опасности возгорания

При освещении по второй схеме необходимо, чтобы входной зрачок объектива также был полностью заполнен светом Для этого изображение светового тела источника света должно быть несколько больше диаметра входного зрачка объектива Здесь также невыгодно применять точечные источники света Однако возможно применять источники света, не имеющие сплошного тела накала, так как изображение светового тела источника света не совмещается с предметом и не мешает наблюдению

При освещении по третьей схеме выгодно применять точечные источники света Хотя идеального параллельного пучка лучей оптические системы и не образуют, но практически позволяют получить близкий к нему пучок лучей

Причиной неравномерности освещенности изображения является сферическая аберрация конденсора Из точки  $A$  (рис 108) выходит широкий пучок лучей После преломления в конденсоре лучи вследствие сферической аберрации не собираются в точке  $A'$  В результате этого образуется каустическая поверхность Этот недостаток наиболее ярко проявляется в одиночной линзе, однако и более сложные системы не свободны от него

Если теоретически последующую оптическую систему (объектив) надо было бы располагать так, чтобы ее световое отверстие совмещалось с  $A'$ , то на практике оно должно совпадать с плоскостью  $GG'$  в наиболее узком месте каустики Тогда через объектив проходит наибольшее количество лучей Но в этом случае луч  $BB'$  может быть задержан оправой линз объектива, а тогда точка предмета  $T$  не будет освещена, и в плоскости изображения будет наблюдаться неравномерность освещения Сферическая аберрация уменьшает угол сходимости лучей  $\omega$  Для увеличения угла сходимости  $\omega$  становится необходимым увеличивать число линз в конденсоре, вычисляя его на минимум сферической аберрации Число линз в сферических конденсорах доходит до 6

**Однолинзовый конденсор.** Одна простая линза применяется в виде конденсора, если сумма углов охвата и сходимости не превышает  $45^\circ$  При освещении какого либо предмета возникает два случая а) источник света расположен в бесконечности и б) источник света находится на конечном расстоянии от конденсора Первый случай практически соответствует освещению дневным светом или от электрического источника света, удаленного от конденсора на расстояние не менее 20 его фокусных расстояний

Выбор того или иного конденсора для практических целей со-

проводится рассмотрением структуры пучка лучей в меридиональной плоскости (рис. 108).

Если источник света расположен в бесконечности, то в качестве конденсора применяется плоско-выпуклая линза, обращенная выпуклостью к источнику света. Представление о сферической aberrации простых линз можем составить из следующих примеров конструкций конденсоров.

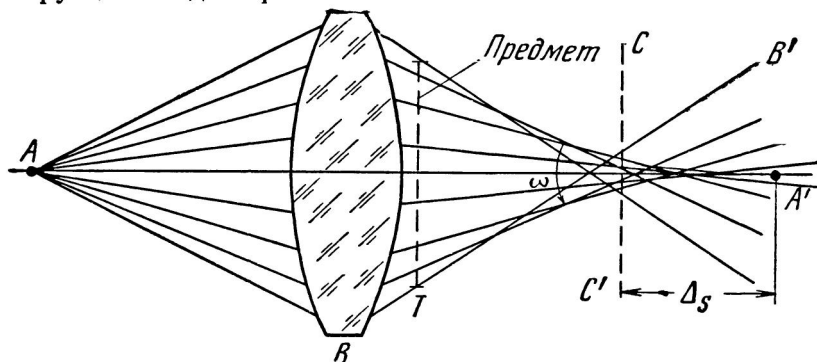


Рис. 108. Каустика конденсора,  $\Delta_s$  — положение плоскости наилучшей наводки

I. Конденсор в виде плоско-выпуклой линзы (табл. 8) имеет конструктивные элементы:  $r_1=14,22$  мм,  $r_2=\infty$ ,  $d=6$  мм, стекло БК10 с показателем преломления  $n=1,5688$ , диаметр 20 мм,  $f'=25$  мм,  $s_{f'}=21,17$  мм. Источник света расположен в бесконечности.

Таблица 8

$h_1$	$n$	Продольная сферическая aberrация $\delta s'$ , мм	Диаметр кружка рассеяния $\delta'$ , мм	Положение плоскости наилучшей наводки $\Delta_s$ , мм	Диаметр каустики в плоскости наилучшей наводки, мм
3	4,20	-0,32	0,08	-0,24	0,02
4	3,10	-0,58	0,19	-0,42	0,05
5	2,50	-0,91	0,39	-0,68	0,10
6	2,10	-1,34	0,71	-1,00	0,19
7	1,80	-1,87	1,18	-1,43	0,28
8	1,56	-2,53	1,94	-2,00	0,40
9	1,40	-3,32	3,06	-2,55	0,70
10	1,25	-4,31	4,80	-3,35	1,10

Если конденсор проектирует световое тело источника света в масштабе 1:1 ( $\beta=-1$ ), то наилучшей формой линзы является двояковыпуклая с равными радиусами.

$-\operatorname{tg} u_1$	$n$	$\delta s', \text{ мм}$	$\delta', \text{ мм}$	$\Delta s, \text{ мм}$	Диаметр каустики в плоскости наилучшей наводки, мм
3/50	4,20	-1,31	0,16	-0,97	0,04
4/50	3,10	-2,33	0,39	-1,66	0,11
5/50	2,50	-3,63	0,78	-2,78	0,18
6/50	2,10	-5,22	1,37	-3,97	0,33
7/50	1,80	-7,10	2,31	-5,51	0,52
8/50	1,56	-9,28	3,64	-7,13	0,82
9/50	1,40	-11,78	5,53	-9,27	1,20
10/50	1,25	-14,63	8,25	-11,60	1,70

II. Конструктивные данные конденсора (табл. 9):  $r_1=27,3 \text{ мм}$ ,  $r_2=-27,3 \text{ мм}$ ,  $d=6 \text{ мм}$ , стекло БК10 с  $n=1,5688$ , диаметр 20 мм,  $f'=25 \text{ мм}$ ,  $s_F'=23 \text{ мм}$ . Источник света расположен на двойном фокусном расстоянии от конденсора ( $s_1=-48 \text{ мм}$ ).

Если конденсор применяется при различных масштабах проекции, то его форма должна удовлетворять условию минимума сферической aberrации.

Из теории aberrаций 3-го порядка известна формула сферической aberrации (при  $\alpha_1=\beta$ ,  $\alpha_3=1$ ,  $n_3=1$ ):

$$\delta s'_{III} = -\frac{1}{2} \operatorname{tg}^2 u' \sum_{k=1}^{k=m} h_k P_k, \quad (57,2)$$

где

$$P_k = \left( \frac{\alpha_{k+1} - \alpha_k}{\mu_{k+1} - \mu_k} \right)^3 (\alpha_{k+1} \mu_{k+1} - \alpha_k \mu_k). \quad (57,3)$$

Здесь  $\alpha$  — угол параксиального луча с оптической осью;  $h_k$  — высоты того же луча, определяемые по формуле (27,4);  $\mu$  — величина, обратная показателю преломления;  $u'$  — апертурный угол в пространстве изображения;  $\delta s'_{III}=0$  при условии  $\sum h_k P_k = 0$ .

Составив суммы  $\sum_{k=1}^2 P_k = p_1 + p_2$  (при  $d=0$  и  $h_1 = h_2 = 1$ ) и продифференцировав, получим выражение для  $\alpha_2$ , удовлетворяющее условию минимума сферической aberrации при заданном линейном увеличении  $\beta$ :

$$\alpha_2 = \frac{(2 + \mu)(\beta + 1)}{2(1 + 2\mu)}. \quad (57,4)$$

Двухлинзовый конденсор применяется, если сумма углов охвата и сходимости достигает  $60^\circ$ . Так как плоско-выпуклая линза имеет сферическую aberrацию, близкую к минимальной, и удобна для изготовления, то одинаковые линзы такой формы нашли себе повсеместное применение в двухлинзовых конденсорах.

Оптический расчет такого конденсора прост, так как линзы обращены выпуклостями друг к другу, у всех линз главные плоскости совпадают с вершинами, а при их соприкосновении, согласно формуле (28,5) при  $\Phi_1 = \Phi_2$ , получаем общую оптическую силу конденсора  $\Phi = 2\Phi_1$ . Диаметры линз делаются одинаковыми. Такие конденсоры применяются при линейном увеличении, близком к  $\beta = -1$ , и невыгодны при положении источника света в бесконечности.

III. Конструктивные данные конденсора (табл. 10):  $r_1 = \infty$ ,  $r_2 = -14,22$  мм,  $r_3 = 14,22$  мм,  $r_4 = \infty$ ,  $d_1 = d_3 = 6$  мм,  $d_2 = 0$ , стекло БК10 с  $n = 1,5688$ , диаметр 20 мм,  $f' = 12,5$  мм,  $s_{F'} = 8,67$  мм. Источник света расположен на двойном фокусном расстоянии конденсора ( $\beta = -1$ ).

Таблица 10

$g \ u_1$	$n$	$\delta s'$ мм	$\delta'$ мм	$\Delta_s$ мм	Диаметр каустики в плоскости наилучшей наводки, мм
-0,10	2,50	-0,435	0,09	-0,31	0,025
-0,15	1,67	-0,965	0,30	-0,74	0,070
-0,20	1,25	-1,683	0,72	-1,28	0,170
-0,25	1,00	-2,571	1,43	-2,00	0,320

Трехлинзовые конденсоры позволяют получить сумму углов охвата и сходимости до  $100^\circ$ . Для абберационного расчета таких и более сложных конденсоров можно использовать условие минимума сферической абберации одиночной линзы.

Допустим, что оптическая система конденсора состоит из  $m$  одиночных линз, а каждая линза равномерно влияет на оптическую силу конденсора и вносит минимум сферической абберации. Тогда в каждом воздушном промежутке, учитывая  $\alpha_1 = \beta$  и  $\alpha_{\text{посл}} = 1$ , углы параксиального луча с оптической осью (нечетные  $\alpha$ ) определяются выражением

$$\alpha_{2t+1} = \alpha_{2t-1} + \frac{\alpha_{\text{посл}} - \alpha_1}{m}, \quad (57,5)$$

где  $t$  — порядковый номер линзы: 1, 2, 3, 4 и т. д.

Четный угол  $\alpha_{2t}$  в каждой линзе вычисляется из условия минимума сферической абберации, и тогда в каждой линзе углы нулевого луча (четные  $\alpha$ ) должны удовлетворять условию

$$\alpha_{2t} = \frac{(2 + \mu)(\alpha_{2t-1} + \alpha_{2t+1})}{2(1 + 2\mu)}. \quad (57,6)$$

Так, например, для конденсоров, имеющих  $\beta = -1$ , изготовленных из стекла с  $n = 1,5688$  (БК10), значения углов  $\alpha$  приведены в табл. 11. Толщины линз выбираются исходя из соображений

апертуры конденсора и фокусного расстояния, а воздушные промежутки близки к нулю (например,  $d=0,1$  мм).

Таблица 11

Конденсор	Однолинзовый	Двухлинзовый	Трехлинзовый	Четырехлинзовый
$\alpha_1$ . . . . .	—1	—1	—1	—1
$\alpha_2$ . . . . .	0	—0,5797	—0,7729	—0,8695
$\alpha_3$ . . . . .	1	0	—0,3333	—0,5
$\alpha_4$ . . . . .	—	0,5797	0	—0,2898
$\alpha_5$ . . . . .	—	1	0,3333	0
$\alpha_6$ . . . . .	—	—	0,7729	0,2898
$\alpha_7$ . . . . .	—	—	1	0,5
$\alpha_8$ . . . . .	—	—	—	0,8695
$\alpha_9$ . . . . .	—	—	—	1

Если же оптическая система применяется как следящий объектив или, например, в качестве положительного компонента афокальной насадки к оптическому квантовому генератору, т. е.  $\alpha_1=0$ , то для линз с той же маркой стекла БК10 получаем значения углов  $\alpha$ , приведенные в табл. 12.

Таблица 12

$\alpha$	Однолинзовый	Двухлинзовый	Трехлинзовый	Четырехлинзовый
$\alpha_1$ . . . . .	0	0	0	0
$\alpha_2$ . . . . .	0,57969	0,289845	0,19323	0,14492
$\alpha_3$ . . . . .	1	0,5	0,33333	0,25
$\alpha_4$ . . . . .	—	0,869535	0,57969	0,43477
$\alpha_5$ . . . . .	—	1	0,66667	0,5
$\alpha_6$ . . . . .	—	—	0,96615	0,72461
$\alpha_7$ . . . . .	—	—	1	0,75
$\alpha_8$ . . . . .	—	—	—	1,01446
$\alpha_9$ . . . . .	—	—	—	1

Наилучших результатов в части исправления сферической аберрации конденсоров и простоте конструкции можно добиться, применяя несферические поверхности. В последнем случае конденсор из двух плоско-выпуклых линз, имеющих несферические поверхности, позволяет получить при  $\beta=-1$  сумму углов охвата и сходимости в  $240^\circ$ .

Трехлинзовые конденсоры особой конструкции (рис. 109) применяются для освещения щелей в спектральных приборах. Назначение конденсора заключается в том, чтобы осветить щель высотой в несколько миллиметров. В рабочем состоянии ширина щели достигает нескольких тысячных или сотых долей миллиметра. Для достижения равномерной освещенности необходимо, чтобы конденсор проектировал изображение источника света во входной зра-

чок объектива коллиматора спектрального прибора. Иногда необходимо для освещения щели выделить определенные участки светового тела источника света. Источник света проектируется конденсорной линзой  $K_1$  в отверстие второй линзы  $K_2$ , выполняющей роль коллектива. Третья конденсорная линза  $K_3$  проектирует изображение источника света во входной зрачок объектива. Осевой пучок лучей показан сплошными линиями, а наклонный — пунк-

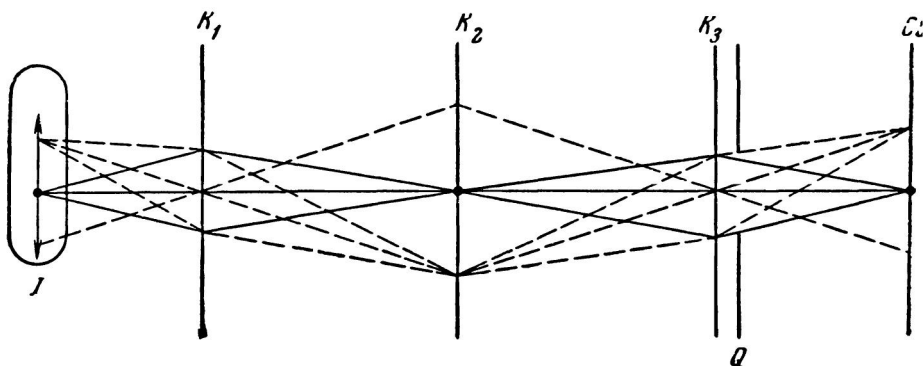


Рис. 109. Трехлинзовый конденсор спектрографа:  $K_1, K_2, K_3$ — конденсорные линзы;  $I$ — источник света;  $Q$ — щель

тирными. Вследствие такой конструкции осветителя создается промежуточное изображение источника света в плоскости линзы  $K_2$ . Если вплотную к линзе  $K_2$  установить диафрагму, то возникнет возможность выделения желаемых участков светящегося тела.

В качестве осветительных систем применяются и зеркала. Среди зеркальных систем различают: 1) сферическую отрицательную поверхность, 2) поверхность параболоида вращения, 3) поверхность эллипсоида вращения, 4) сложные системы из сферических поверхностей.

Простая отражательная сферическая поверхность имеет ограниченное применение вследствие значительной сферической аберрации. Зеркало применяется для более полного использования светового потока источника света. Такое зеркало по отношению к оптическому прибору или освещаемому предмету устанавливается сзади источника света. Источник света располагается в центре кривизны этого зеркала. Зеркалу дают небольшой наклон, и лучи света, отразившись от него, минуя световое тело источника света, проходят далее, освещая рассматриваемый предмет. Примером такого применения является зеркало в осветительном устройстве кинопередвижки.

В оптических приборах часто применяют поверхности 2-го порядка. Поверхность параболоида вращения позволяет собрать в точку лучи, идущие параллельно друг другу, если они идут параллельно оси. Следовательно, если источник света разместить в фо-

кусе параболы, то поверхность параболоида вращения будет образовывать параллельный пучок. Этот принцип широко применяется в прожекторах. Поверхность эллипсоида вращения позволяет собирать в одну точку, в один фокус лучи, если они вышли из другой точки, другого фокуса, отсюда следует, что если поместить источник света в одном фокусе эллипса, а входной зрачок объектива — в другом, то возможно равномерно осветить предмет, который должен проектироваться этим объективом. Оптическая схема подобной системы освещения показана на рис. 110. Она широко применяется в фотограмметрических приборах — трансформаторах и уменьшителях, а также в кинопроекторах.

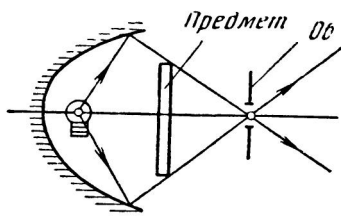


Рис. 110 Зеркальная осветительная система

Сложные зеркальные системы из двух сферических поверхностей (см. рис. 104) применяются для освещения экрана осциллоскопов, например, ультрафиолетовым светом, при некоторых специальных наблюдениях.

## § 58. ПРОЕКЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Оптические приборы, дающие изображения на экране, называются *проекционными*. К числу таких приборов относятся: кинопроекционный аппарат, эпидиаскоп, большой проектор и др.

В зависимости от характера проектируемого предмета все проекционные системы разделяются на два вида: *эпископические* и *диаскопические*. Если предмет непрозрачен, то изображение образуется лучами света, отраженными от предмета. Такой вид проекции называется *эпископической*, или проекцией в отраженных лучах света. Если предмет прозрачен, то изображение образуется лучами света, проходящими сквозь предмет. Такой вид проекции называется *диаскопической*, или проекцией в проходящих лучах света.

Оптическая схема любой проекционной системы состоит из двух частей: *осветительной* и *оптической*. Осветительная часть включает в себя источники света, конденсоры и зеркала, назначение которых заключается в наилучшем освещении того или иного предмета. Его характеристики должны соответствовать характеристикам оптической части прибора. Оптическая часть большей частью представляет собой проекционный объектив. В сложных проекционных приборах, требующих изменения направления пучков лучей, применяются, кроме того, призмы и зеркала, а в особых случаях и дополнительные объективы.

Схема эпископа показана на рис. 111. Прибор имеет вид шара с плоским основанием, к которому снизу прижимают проектируемый предмет (чертеж, текст, картинку), и круглым вырезом в верх-

пей части, в который ввинчивают объектив. Над объективом всегда укрепляют алюминированное плоское зеркало для получения на экране правильного (читаемого) прямого изображения.

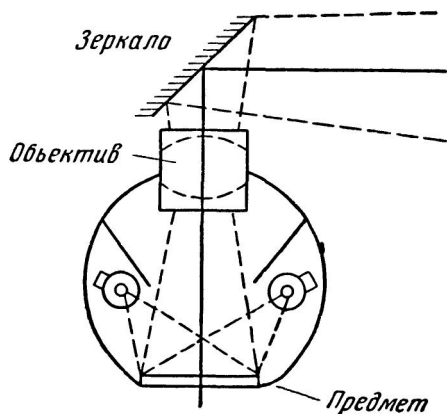


Рис. 111. Эпископ

К числу приборов диаскопической проекции относятся, например, фотоувеличители, проекторы, применяемые в аэрогеодезии (проектор Дробышева, мультиплекс) и др. Схема таких приборов показана на рис. 112, а. Источник света с помощью конденсора проектируется во входной зрачок объектива (см. рис. 107, б). Предмет в виде негатива или диапозитива устанавливается возможно ближе к конденсор.

Кинопроекционные системы (рис. 112, б) также относятся к диаскопическим. Но в

этих системах для достижения лучшей освещенности экрана зеркальная или линзовая конденсорные системы большей частью проектируют изображение источника света в области положения самого предмета — кинокадра (см. рис. 107, а). Малый размер кинокадра ( $16 \times 22$  или  $18 \times 24$  мм) оправдывает такой способ освещения, а его быстрая смена предохраняет от возгорания или порчи. Приборы, сочетающие в себе оба вида проекции — эпископическую и диаскопическую, — называются эпидиаскопами. Такие приборы используются для демонстрации графиков, рисунков и т. п. при проведении лекций и докладов.

Основными оптическими характеристиками проекционных систем являются: 1) масштаб проекции (линейное увеличение); 2) освещенность изображения и 3) размер экрана (величина проектируемого предмета). Они характеризуются: 1) проекционным расстоянием, 2) фокусным расстоянием проекционного объектива и 3) относительным отверстием проекционного объектива.

Размеры проектируемых предметов бывают весьма различными — от десятых долей миллиметра (микропроекция) до  $30 \times 30$  см (большой и малый фототрансформаторы). Также различны и экраны. В приборах встречаются экраны в несколько квадратных сантиметров, а в кино несколько сотен квадратных метров. В приборах обычно встречаются небольшие масштабы проекции, близкие к единице, но в кинопроекции они достигают величин порядка 400 : 1 и более.

*Проекционным расстоянием* называется расстояние от объектива до экрана. Оно определяет длину зрительного зала в кинотеатре.



Проекционное изображение обычно бывает значительных размеров, и оно должно быть достаточно и равномерно освещено. Кроме того, в пределах всей площади изображение должно быть резким. Освещенность изображения определяется яркостью источника света  $B$  (в нитах), коэффициентом пропускания света  $\tau$ , линейным увеличением объектива  $\beta$ , диафрагменным числом объектива  $n$ .

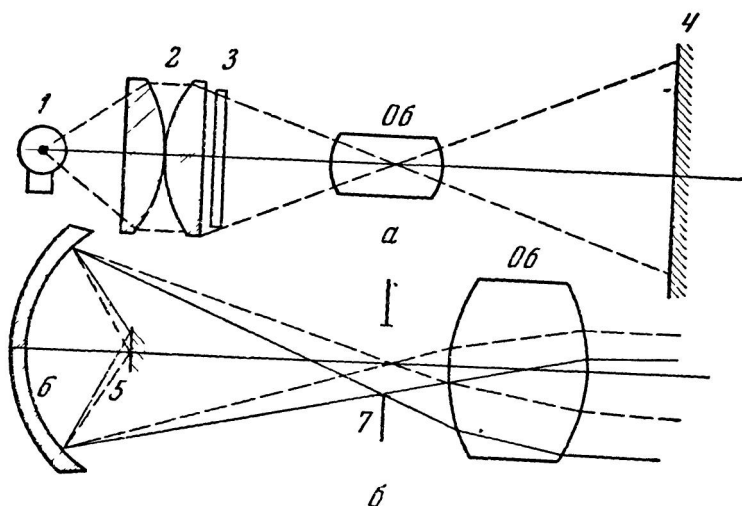


Рис 112 Проекция в проходящем свете а) диапроекция: 1 — источник света, 2 — конденсор; 3 — негатив (диапозитив); 4 — экран, б) кинопроекция 5 — кратер дуги, 6 — зеркало, 7 — кадр

В случае епископической проекции освещенность изображения равна

$$E' = \frac{\tau \cdot \rho \cdot E}{4(1 - \beta)^2 n^2}, \quad (58,1)$$

где  $\rho$  — коэффициент отражения предмета,  $E$  — освещенность предмета (в люксах).

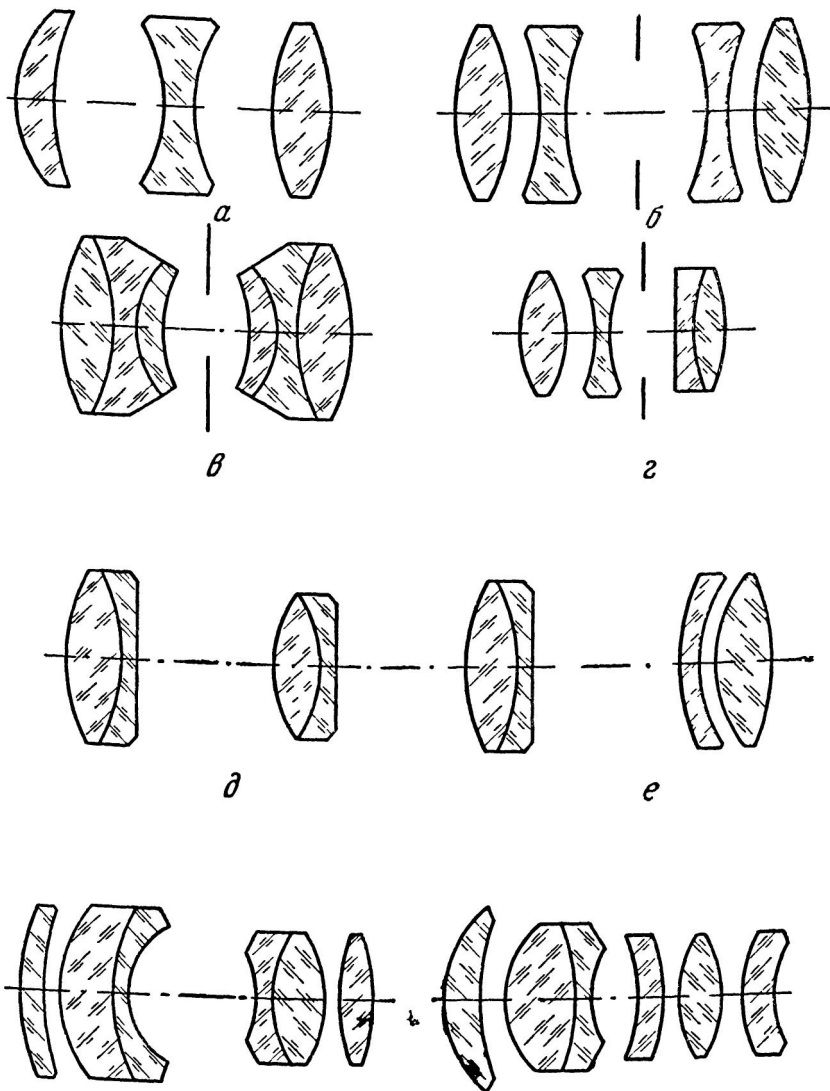
В случае диаскопической проекции освещенность изображения равна

$$E' = \frac{\pi B \tau}{4(1 - \beta)^2 n^2}. \quad (58,2)$$

Освещенность изображения на экране в случае кинопроекции также определяется формулой (58,2). Освещенность экрана в кинотеатрах составляет 60—120 лк.

Проекционные объективы близки к фотографическим (рис. 113). Они разделяются на три группы:

1. Епископические объективы с относительными отверстиями 1:2—1:3,5 и полем зрения  $2\omega = 45^\circ$ .



ж

з

Рис 113 Проекционные объективы: а — Триплет,  $1:3,5$ ,  $2\omega=45^\circ$ , б — Орто-Ниар,  $1:6,3-1,7,7$ ,  $2\omega=60^\circ$ ; в — Луч,  $1:6,8$ ,  $2\omega=70^\circ$ , г — Индустар-234,  $1:3,5$ ,  $2\omega=50^\circ$ , д — Po-101, Po-106, Po-107,  $1:2,2$ ,  $2\omega=12^\circ$ , е — Po-108,  $1:2$ ,  $2\omega=16^\circ$ , ж — 8Л-82, Po-800, Po-59,  $1:2$ ,  $2\omega=14^\circ$ ; з — Po-109, Po-110, Po-111,  $1:1,2$ ,  $2\omega=20^\circ$

2. Объективы проекторов и увеличителей с относительным отверстием 1 : 4,5—1 : 9 и полем зрения до  $2\omega = 122^\circ$ .

3. Кинопроекционные объективы с относительными отверстиями 1 : 1,2—1 : 2 и полем зрения до  $2\omega = 16^\circ$ .

Оптические характеристики проекционных объективов приведены в табл. XII приложения.

**Пример 26.** Определить освещенность экрана при эпипроекции с 10-кратным увеличением. Относительное отверстие объектива 1 : 2, коэффициент светопропускания системы 0,6, а коэффициент отражения освещаемого предмета 0,8. Предмет (лист текста) освещается двумя электрическими лампами накаливания по 500 вт, расположенными сбоку на расстоянии 200 мм от центра предмета. Угол между оптической осью объектива и линией, соединяющей источник света с центром предмета,  $45^\circ$ .

**Решение.** Из условий примера следует:  $\beta = -10$ ;  $n = 2$ ;  $\tau = 0,6$ ;  $\rho = 0,8$ ;  $i = 45^\circ$ ;  $r = 0,2$  м.

Решение задачи разделяется на два этапа. Первоначально по формуле (24,9) необходимо найти освещенность предмета, а затем по формуле (58,1) освещенность экрана.

Освещенность предмета не является равномерной по всей площади, но участки, наиболее освещаемые одной лампой, получают наибольшую освещенность от другой, поэтому в практике определяют освещенность в центре предмета и принимают ее за условную освещенность всего предмета.

Из каталога электрических ламп накаливания имеем  $I = 700$  св, тогда освещенность предмета

$$E = \frac{2I \cos i}{r^2} = 24\,800 \text{ лк},$$

а экрана

$$E' = \frac{\tau \rho E}{4(1 - \beta)^2 n^2} = 6,1 \text{ лк}.$$

**Пример 27.** Оптическая система диапроектора состоит из электрической пустотной 40-ваттной лампы, конденсора и проекционного объектива с относительным отверстием 1 : 5, проектирующего предмет на экран с 10-кратным увеличением. Коэффициент пропускания света оптической системы диапроектора составляет 0,6. Найти освещенность экрана.

**Решение.** Из условий примера следует:  $\tau = 0,6$ ;  $n = 5$ ;  $\beta = -10$ . Из табл. II следует:  $B = 22 \cdot 10^5$  нит.

Применим формулу (58,2):

$$E' = \frac{\pi B \tau}{4(1 - \beta)^2 n^2} = 342 \text{ лк}.$$

**Пример 28.** Определить освещенность экрана в кинотеатре при проекции с 400-кратным увеличением объективом с относительным отверстием 1 : 2, если коэффициент пропускания света оптической

системы составляет 0,5, а яркость источника света (дуга)  $1,5 \cdot 10^8$  нит.

**Решение.** Объектив с относительным отверстием 1:2 имеет  $n=2$ , а 400-кратному увеличению соответствует  $\beta=400$ .

Формулу (58,2) напомним так:

$$E' = \frac{\pi V \tau}{4\beta^2 n^2} = 93 \text{ лк.}$$

## § 59. КОЛЛИМАТОРЫ И АВТОКОЛЛИМАТОРЫ

*Коллиматором* называется оптический прибор, образующий параллельный пучок лучей. Коллиматор часто применяется для всякого рода контрольных испытаний и исследований оптических

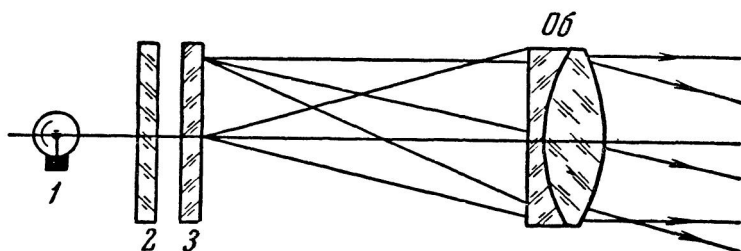


Рис. 114. Коллиматор: 1 — источник света; 2 — молочное или матовое стекло; 3 — сетка

деталей и узлов. Он является частью ряда приборов: спектральных, контрольно-измерительных, прицельных, приборов связи и сигнализации и др. Оптическая схема коллиматора показана на рис. 114. Источник света освещает плоскопараллельную пластинку — сетку, имеющую какие-либо штрихи или отверстия на темном фоне. Для более равномерного освещения между источником света и сеткой, как можно ближе к сетке, устанавливают молочное или матовое стекло. Сетку помещают в фокальной плоскости объектива. Тогда из объектива лучи выходят в виде параллельных пучков.

Коллиматор широко применяется в различных сигнальных фотоэлектрических устройствах (фотореле). Пучок лучей, вышедший из объектива коллиматора, направляется на фотоэлемент (рис. 115, а). Если пучок лучей преградить, то прекратится падение лучей света на фотоэлемент и тем самым исчезнет фототок. Фототоки усиливаются и поступают в электромагнитное реле, которое, смотря по необходимости, срабатывает, когда ток впервые возникает или когда ток исчезает. Подобное устройство нашло широкое применение в автоматике, во многих отраслях техники. Фотореле сигнализирует об обрыве бесконечных лент, об обрыве

бумаги, тканей и т. п. Оно используется для автоматического счета изделий, для регулирования наполнения сосудов и т. д.

Для получения параллельного пучка лучей необходим точечный источник света. Однако все современные электрические источники света имеют световое тело сравнительно большого размера.

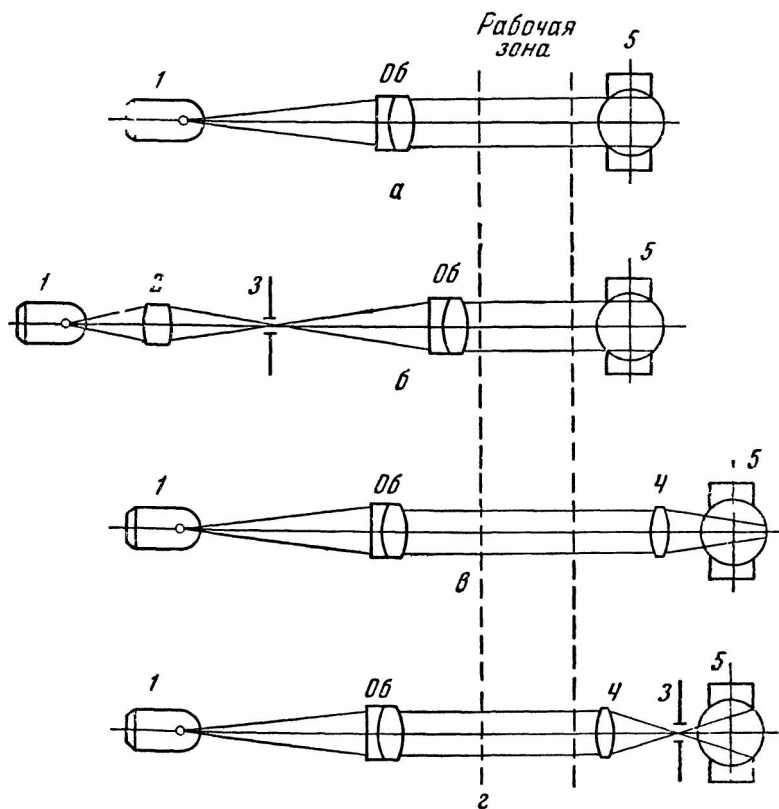


Рис 115 Оптическая схема фотореле 1 — источник света, 2 — конденсор I, 3 — диафрагма, 4 — конденсор II, 5 — фотозлемент

Например, электролампа СГ2 имеет тело накала  $0,9 \times 1,5$  мм. Применение этой лампы при фокусном расстоянии объектива коллиматора 150 мм дает угловую величину светового рассеяния лучей примерно в  $40'$ .

Введение в систему коллиматора, конденсора и диафрагмы позволяет получить искусственный точечный источник света (рис. 115, б). Источник света с помощью конденсора, обычно при  $\beta = -1$ , освещает отверстие в диафрагме (0,1—0,3 мм). Диафрагма устанавливается в переднем фокусе объектива. Подобным образом удастся уменьшить угол светового рассеяния лучей до  $7'$ .

Расстояния между коллиматором и фотоэлементом могут достигать нескольких метров. Необходимо лишь иметь совмещенными оптическую ось объектива и смотровую ось фотоэлемента. В пределах всего расстояния между объективом и фотоэлементом освещенность площадки, поставленной нормально к пучку лучей, практически остается неизменной. Лишь на больших расстояниях, на которых сказываются рассеяние света, задымленность атмосферы, начинает изменяться освещенность и уменьшаться количество фототока.

Освещенность фотоэлемента практически равна освещенности выходного зрачка объектива, тогда на основании (24,7)

$$E' = \frac{F'}{S_{об}},$$

где  $S_{об}$  — площадь выходного зрачка объектива.

Воспользуемся формулой (28,2), из которой при  $n=n'=1$  получим освещенность отверстия диафрагмы, установленной в передней фокальной плоскости объектива

$$E = \pi B \tau \sin^2 u'.$$

В этой формуле апертурный угол  $u'$  заменим приближенно равным ему углом

$$u' = \frac{1}{2n},$$

где  $n$  — диафрагменное число объектива.

Тогда получим

$$E = \frac{\pi B \tau}{4n^2}.$$

Определим световой поток, пронизывающий отверстие этой диафрагмы с площадью  $S \cdot F' = SE$ . Площадь отверстия этой диафрагмы

$$S = \pi \frac{\sigma^2}{4},$$

где  $\sigma$  — диаметр отверстия диафрагмы. Наибольшее значение диаметра отверстия может быть равно величине изображения светового тела. Если же диаметр диафрагмы меньше диаметра изображения светового тела источника света, то под  $\sigma$  понимается диаметр отверстия. Тогда

$$F' = \frac{\pi^2 B \tau \sigma^2}{16n^2}. \quad (59,1)$$

Если диаметр отверстия диафрагмы равен диаметру изображения светового тела, то световой поток можно найти по формуле

$$F' = \frac{F_0 \tau}{16n^2}, \quad (59,2)$$

где  $F_0$  — общий световой поток точечного источника света, известный из каталога.

Если отверстие диафрагмы меньше изображения светового тела, то световой поток также можно вычислить по формуле (59,2), но вместо значения светового потока источника света  $F_0$  из каталога необходимо подставить вычисленное по формуле

$$F = \frac{F_0 \sigma^2}{f_0^2},$$

где  $l_0$  — диаметр светового тела источника света, т. е. в этом случае

$$F' = \frac{F_0 \tau \sigma^2}{16 n l_0^2}. \quad (59,3)$$

Для определения освещенности выходного зрачка объектива, и, что практически одно и то же, освещенности поверхности фотоэлемента, на которую падает параллельный пучок лучей, воспользуемся формулой (59,3). Одинаковость этих освещенностей обычно соблюдается на протяжении нескольких метров и зависит прежде всего от сферической аберрации объектива и состояния среды между объективом и фотоэлементом. Площадь выходного зрачка объектива  $S_{об}$  равна

$$S_{об} = \frac{\pi D^2}{4}.$$

Тогда

$$E' = \frac{\tau F_0 \sigma^2}{4 \pi f'^2 l_0^2}, \quad (59,4)$$

или

$$E' = \frac{\pi B \tau \sigma^2}{4 f'^2}. \quad (59,5)$$

Поверхность фотоэлемента  $S_c$  может быть меньше поверхности объектива, тогда световой поток, падающий на фотоэлемент, определится из выражения

$$F' = \frac{\pi B \tau \sigma^2 S_c}{4 f'^2}. \quad (59,6)$$

Реакция фотоэлемента (сила тока в амперах) на этот поток определяется из интегральной чувствительности фотоэлемента  $S_0$ :

$$i = \frac{S_0 \pi B \tau \sigma^2 S_c}{4 f'^2} \text{ [амп]}. \quad (59,7)$$

Если же световой поток, пронизывающий отверстие диафрагмы  $\sigma$ , полностью доходит на фотоэлемент (например, рис. 115, в), то

$$i = \frac{S_0 \pi^2 B \tau \sigma^2}{16 n^2} \text{ [амп]}. \quad (59,8)$$

В целях надежного действия фотоэлемента необходимо следить, чтобы световой поток, вычисленный по формулам (59,1) или (59,6), по крайней мере на порядок превосходил пороговую чувствительность светоприемника.

Для предохранения от засветки рабочей поверхности светоприемника посторонним боковым светом между линзой и светоприемником задней фокальной плоскости линзы устанавливают диафрагму (рис. 115, з).

Эти формулы справедливы для коллиматоров фотоэлектрических, спектральных и сигнальных приборов, так как относительное отверстие объективов этих приборов невелико (не более 1 : 2). При определении же освещенности в параллельном пучке прожекторов, относительные отверстия которых превосходят 1 : 2, следует применять формулу Корякина

$$E = I\tau \frac{\cos^4 \frac{u'}{2}}{f'^2}, \quad (59,9)$$

где  $I$  — сила света источника света.

*Автоколлиматором* называется оптический прибор, образующий параллельные пучки лучей и воспринимающий эти пучки обратно. Оптическая схема автоколлиматора показана на рис. 116.

Представим себе, что в фокальной плоскости объектива находится точка предмета  $A$ . Точка  $A$  освещается каким-либо способом и становится как бы самосветящейся. Лучи от точки  $A$  выходят из объектива параллельно друг другу. Далее они падают на зеркальную поверхность и отражаются обратно. Если зеркальная поверхность расположена перпендикулярно оптической оси объектива, то лучи соберутся в фокальной плоскости объектива по другую сторону оптической оси, в точку  $A'$  на таком же расстоянии от оси, на каком точка  $A$  находилась от оси. Лучи же, вышедшие из точки  $O$  на оптической оси, соберутся снова в точке  $O$ .

Если зеркальная поверхность будет наклоняться, то изображение будет смещаться вдоль направления наклона. Величина смещения изображения будет пропорциональна половине угла наклона зеркала, т. е.

$$l' = f' \operatorname{tg} 2\varphi. \quad (59,10)$$

Автоколлимационный принцип образования изображения нашел себе применение в спектральных приборах, в оптиметрах и многих других контрольно-измерительных и юстировочных приборах (рис. 117). Характерным отличием визуальных автоколлимационных приборов является наличие *автоколлимационного окуляра*. Любой положительный окуляр можно превратить в автоколлимационный, придав ему осветительное устройство для освещения сетки. Наиболее употребительными являются системы с плоскопараллельной пластинкой, поставленной под углом  $45^\circ$  к оптиче-



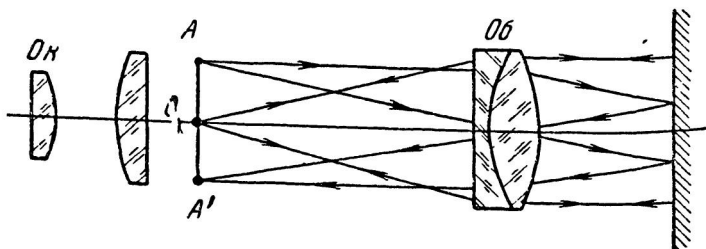


Рис. 116 Автоколлиматор

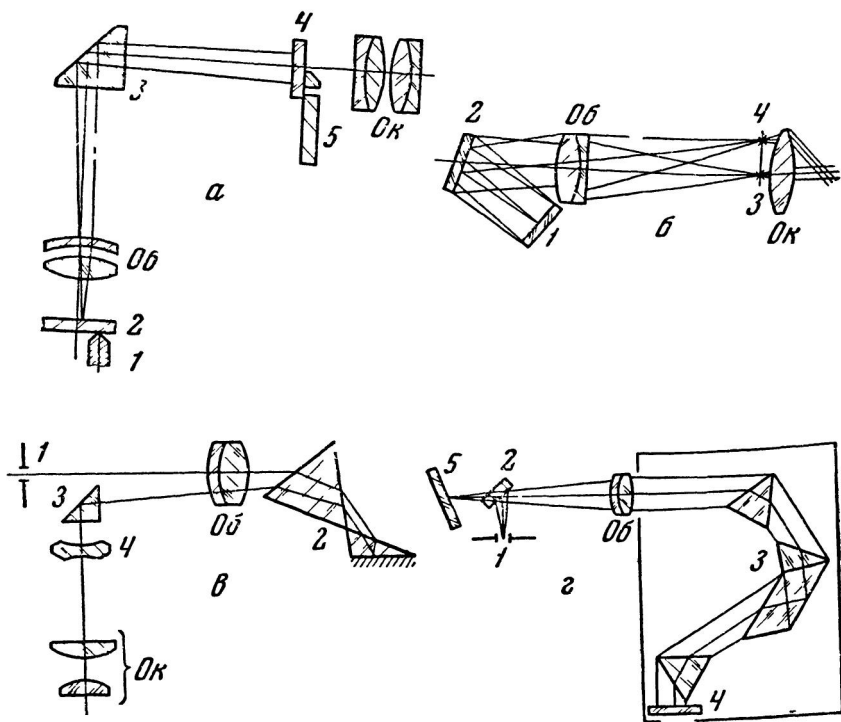


Рис 117. Оптические схемы автоколлимационных приборов:  
*а* — оптиметр: 1 — измерительный штифт, 2 — зеркало, 3 — призма, 4 — сетка, 5 — осветительные призмы; *б* — гравитационный вариометр: 1 — неподвижное зеркало, 2 — вращающееся зеркало, 3 — источник света, 4 — изображение; *в* — стилоскоп НИИФ МГУ: 1 — щель, 2 — преломляющие призмы, 3 — призма, 4 — отрицательная линза; *г* — спектрограф Цейсса: 1 — источник света, 2 — полупосеребряное зеркало, 3 — спектральные призмы, 4 — зеркало, 5 — фотопластинка

ской оси, и с призмой, вводимой в фокальную плоскость (система Гаусса).

Допустим, что плоскопараллельная пластинка расположена между окуляром и объективом, вблизи окуляра (рис. 118) таким образом, что расстояние от освещенного предмета  $P$  до оптической оси, до точки  $a$ , равно расстоянию от этой же точки до фокальной плоскости (с учетом удлинения луча в пластинке). Тогда

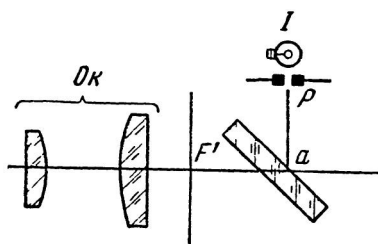


Рис. 118. Автоколлимационный окуляр с пластинкой

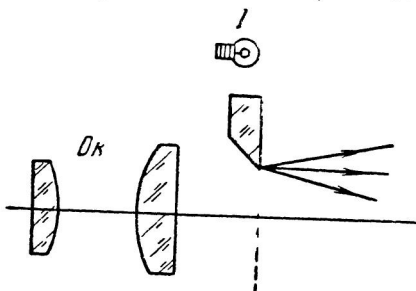


Рис. 119. Автоколлимационный окуляр с призмой

наблюдатель в окуляр увидит автоколлимационное изображение точки  $P$ . Пластинка может быть установлена и между фокальной плоскостью и коллективной линзой окуляра и даже между линзами окуляра. В этих случаях она непосредственно осветит штрихи сетки, расположенной в фокальной плоскости окуляра. Достоинством такого типа автоколлимационного окуляра является свободное от каких-либо посторонних устройств поле зрения. Недостатком ее является слабая освещенность изображения. Для освещения используется только небольшая часть света, отраженного от полированной поверхности стекла.

Имеется возможность, закрыв часть поля зрения, в фокальную плоскость ввести узкую призму (рис. 119) и через нее осветить тот или иной штрих сетки (система Аббе). В этом случае освещенность автоколлимационного изображения будет хорошая, но зато часть поля будет закрыта призмой.



Рис. 120. Автоколлимационный окуляр Захарьевского

Недостатки обоих этих автоколлимационных окуляров устранены в автоколлимационных окулярах В. П. Линника и А. Н. Захарьевского. В окуляре Линника трехгранная стеклянная призма—нить толщиной 0,1—0,2 мм, приклеивается к сетке. Эта

нить одновременно является и штрихом сетки и освещенным предметом в плоскости сетки, так как грань нитевидной призмы освещается сбоку источником света. Автоколлимационный окуляр Захарьевского имеет две прямоугольные призмы (рис. 120) с углами  $40^\circ$  и  $50^\circ$ . Поверхности  $ab$  и  $cd$  посеребрены. Фокальные плоскости объектива и окуляра совмещены и расположены в плоскости  $ab$ . На поверхности  $ab$  процарапан штрих  $K$  и сзади освещен источником света. Тогда его автоколлимационное изображение будет в  $K'$ .

Объективы коллиматоров и автоколлиматоров характеризуются фокусным расстоянием и диаметром входного зрачка (световым отверстием). Объективы коллиматоров должны быть тщательно исправлены на сферическую и хроматическую аберрации. Эти аберрации нарушают параллельность выхода лучей из объектива. Чтобы избежать влияния сферической аберрации, объективы коллиматоров применяют с малым относительным отверстием, например:  $1:12$ ,  $1:15$  и  $1:20$ . А так как диаметры отверстий должны быть часто значительны, то объективы коллиматоров обычно имеют большие значения фокусных расстояний. Фокусные расстояния объективов коллиматоров достигают 5 и более метров. В приборах часто применяют объективы с фокусными расстояниями 400—600 мм. Преобладающее число объективов коллиматоров и автоколлиматоров состоит из двух линз, составляющих ахроматический объектив. Линзы объектива разделяются воздушным промежутком, если диаметр линз превосходит 60 мм.

**Пример 29.** Определить необходимый световой поток электролампы фотореле, если фотоэлемент имеет площадь  $4 \text{ см}^2$  и для него необходим световой поток в  $0,1 \text{ лм}$ . Коэффициент пропускания света  $0,78$ , а фокусное расстояние объектива коллиматора фотореле  $f' = 90 \text{ мм}$ .

**Решение.** Определим необходимую освещенность фотоэлемента по формуле (24,7), имея в виду, что  $F = 0,1 \text{ лм}$ , а  $S_c = 0,0004 \text{ м}^2$ :

$$E' = \frac{F}{S_c} = 250 \text{ лк.}$$

Затем определим необходимый световой поток по формуле (59,4), в которой полагаем  $\sigma = I_0$ , а  $f' = 0,09 \text{ м}$ :

$$F_0 = \frac{4\pi f'^2 E'}{\tau} = 32,5 \text{ лм.}$$

Такой характеристике соответствует лампа для сигналов  $6 \text{ в}$ ,  $4 \text{ вт}$ , имеющая световой поток  $35 \text{ лм}$ .

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

### Основная

- 1 Бегунов Б Н Геометрическая оптика Изд во МГУ, 1961
- 2 Тудоровский А И Теория оптических приборов М—Л, Изд-во АН СССР, т I, 1948, т II, 1952
- 3 Турыгин И А Прикладная оптика «Машиностроение», 1965
- 4 Фефилов Б. В Прикладная оптика М, Геодиздат, 1957

### Дополнительная К главе I

- 5 «XV лет Государственного оптического института» Л, ГТИИ, 1936
- 6 «Материалы к докладам акад С И Вавилова и акад Д С Рождественского «О работах Государственного оптического института» М—Л, Изд-во АН СССР, 1936
- 7 Вавилов С И Советская наука на новом этапе М—Л, Изд во АН СССР, 1946
- 8 Лазарев П П Очерки истории русской науки Л, Изд во АН СССР, 1950
- 9 Соболев С П Оптические инструменты и сведения о них в допетровской Руси «Тр Ин та истории естествознания АН СССР», т III, 1949
- 10 Соболев С П История микроскопа и микроскопические исследования в России в XVIII веке М—Л, Изд во АН СССР, 1949
- 11 Ченекал В П Природа света в воззрениях русских естествоиспытателей XVII и начале XIX века «Тр Ин та естествознания АН СССР», т III, 1949

### К главе II—VI

- 12 Русинов М М Техническая оптика М—Л, Машгиз, 1961
- 13 Русинов М М Габаритные расчеты оптических систем М, Госгеолтехиздат, 1963
- 14 Слюсарев Г Г Методы расчета оптических систем Л—М, ОНТИ, 1937
- 15 Слюсарев Г Г Геометрическая оптика М—Л, Изд-во АН СССР, 1946
- 16 Чуриловский В Н Теория оптических приборов М—Л, Машиностроение, 1965

### К главе VII

- 17 «Оптика в военном деле» М—Л, Изд-во АН СССР, т I, 1945, т II, 1948
- 18 «Справочник конструктора оптико-механических приборов» М—Л, Машгиз, 1963
- 19 Кравков С В Глаз и его работа М—Л, Изд-во АН СССР, 1950
- 20 Михель К Основы теории микроскопа М, ГИТТЛ, 1955
- 21 Русинов М. М Фотограмметрическая оптика М, Геодиздат, 1962.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица I

## Постоянные оптических стекол

Марка стекла	$n_D$	$\nu$	Марка стекла	$n_D$	$\nu$
ЛК2	1,4686	66,28	ТФ3	1,7172	29,50
ЛК3	1,4874	70,03	ТФ4	1,7398	28,15
К8	1,5163	64,06	ТФ5	1,7550	27,52
БК10	1,5688	56,04	ТФ6	1,9000	20,99
ТК16	1,6126	58,34	ТФ7	1,7280	28,33
СТК1	1,7175	46,80	ТФ8	1,6893	31,12
ТФ1	1,6475	33,86	ТФ10	1,8060	25,36
ТФ2	1,6725	32,22	СТФ1	2,0361	18,10

Таблица II

## Яркости источников света и рассеивающих поверхностей

Источник света	Яркость в нитах
Наименьшая различаемая яркость . . . . .	$10^{-6}$
Ночное безлунное небо . . . . .	$10^{-4}$
Лист белой бумаги ( $E = 35$ лк) . . . . .	10
Экран в кинотеатре . . . . .	5—100
Яркость на сцене театра . . . . .	0,1—130
Экран кинескопа . . . . .	240
Небо в пасмурную погоду . . . . .	1000
Ясное небо в $75^\circ$ от солнца . . . . .	1500
Поверхность луны . . . . .	2500
Ясное небо . . . . .	4000
Экраны проекционных кинескопов . . . . .	1000—5000
Пламя стеариновой свечи . . . . .	5000
Люминесцентные лампы . . . . .	3000—10 000
Открытое газовое пламя . . . . .	10 000
Небо, покрытое светлыми облаками . . . . .	10 000
Пламя керосиновой лампы . . . . .	12 000
Матированная 40 <i>вт</i> лампа . . . . .	25 000
Снег под прямыми лучами солнца . . . . .	30 000
Белая матовая поверхность при солнечном свете . . . . .	32 000
Ацетиленовое пламя . . . . .	80 000
Нить угольной лампы . . . . .	$8 \cdot 10^5$
Матированная газополная 2000 <i>вт</i> лампа . . . . .	$13 \cdot 10^5$
Нить вольфрамовой 40- <i>вт</i> лампы (пустотной) . . . . .	$22 \cdot 10^5$
Кратер простой дуги . . . . .	$1,4 \cdot 10^8$ — $1,6 \cdot 10^8$
Солнце . . . . .	$1,5 \cdot 10^9$
Ртутные лампы сверхвысокого давления . . . . .	$4 \cdot 10^8$ — $1,8 \cdot 10^9$
Солнце вне земной атмосферы . . . . .	$1,9 \cdot 10^9$

## Окулярные зрительные трубы

Окуляр	Фокусное расстояние $f'$ , мм	Окулярное увеличение, Г	Поле зрения, $2\omega'$ , град	Диаметр зрачка выхода $D'$ , мм	Переднее верхнее фокусное расстояние $s_F'$ , мм	Положение зрачка выхода $t'$ , мм
Симметричный . . . . .	20	12,5	40	4	14,9	15—24
» . . . . .	25	10	40	5	18,9	19—30
» . . . . .	30	8,3	40	6	22,8	23—36
» . . . . .	40	6,2	40	8	30,5	30—48
» . . . . .	50	5,0	40	10	37,9	38—60
Кельнера . . . . .	20	12,5	45	4	5,8	8—14
» . . . . .	25	10,0	45	5	7,4	10—17,5
» . . . . .	30	8,3	45	6	8,9	12—21
» . . . . .	40	6,2	45	8	12,2	16—28
» . . . . .	50	5,0	45	10	14,9	20—35
С удаленным зрачком	20	12,5	50	4	6,3	18—25
» . . . . .	25	10,0	50	5	7,8	23—31
» . . . . .	30	8,3	50	6	9,6	27—37
» . . . . .	40	6,2	50	8	13,9	36—50
» . . . . .	50	5,0	50	10	16,8	45—62
Эрфле . . . . .	20	12,5	60	4,8	6,1	14—18
» . . . . .	25	10,0	60	6	8,9	17,5—23
» . . . . .	30	8,3	60	7,2	10,6	21—27
» . . . . .	40	6,2	60	9,6	10,3	28—36
» . . . . .	50	5,0	60	12	18,6	35—45

Таблица IV

## Ахроматические микрообъективы слабого увеличения

Объектив	Линейное увеличение, $\beta$	Апертура, $A$	Поле зрения $2l$ , мм	Рабочий отрезок $S_1$ , мм	Фокусные расстояния $f'$ , мм	Длина тубуса, мм
MT-24 . . . . .	1	0,04	16,2	—	136,3	—
MT-23 . . . . .	1,5	0,05	10,8	—	93,2	—
OM-3П . . . . .	3,5	0,10	5,0	24,85	29,92	160
OM-12 . . . . .	3,7	0,11	4,8	27,73	33,10	160
OM-12M . . . . .	4,7	0,11	3,8	25,90	33,10	190
MT-22 . . . . .	5	0,13	3,24	—	44,2	—
OM-22 . . . . .	6,0	0,11	3,0	27,5	24,90	160
OC-6 . . . . .	6,0	0,15	3,0	11,00	23,30	160
M-42 . . . . .	8,0	0,20	2,2	9,19	18,00	160
OM-2 . . . . .	9,0	0,20	0,9	13,84	15,50	160
— . . . . .	10,0	0,25	2,0	6,50	15,30	160
OM-5 . . . . .	10,0	0,30	1,8	5,17	16,10	160
OM-18 . . . . .	10,0	0,30	1,8	7,77	15,50	160
OM-33-Л . . . . .	10,0	0,40	1,8	3,45	15,98	160
OX-33 . . . . .	—	0,12	2	19	33,00	—
OX-23 . . . . .	—	0,17	1,9	6,17	23,17	—
OX-14 . . . . .	—	0,30	1,8	5,17	13,89	—

## Окуляры микроскопов

Окуляр	Окулярное увеличение, $\Gamma$	Фокусное расстояние $f'$ , мм	Поле зрения $2\omega$ , мм	Диаметр зрачка выхода $D'$ , мм	Тип окуляра
АМК-9 . . . . .	3	83,0	15	5,0	кварцевый
АМ-25 . . . . .	3	83,0	24	5,0	компенсационный
АМ-4, АМ-6 и АМ-30 . . . . .	4	62,0	24	3,6	Гюйгенса
АМ-12 . . . . .	5	49,8	23	3,0	компенсационный
АМ-21 . . . . .	5	49,8	23	3,0	широкоугольный
АШ-6 . . . . .	6	42,0	24	2,5	»
М-7 и АМ-11 . . . . .	7	36,0	18	2,0	Гюйгенса
АМ-13 . . . . .	7	35,0	18	2,1	компенсационный
АМК-1 . . . . .	8	31,4	15	1,8	кварцевый
АШ-8 и АМ-8 . . . . .	8	31,4	21	1,8	широкоугольный
М-10 . . . . .	10	24,8	14	1,5	Гюйгенса
АМ-10 . . . . .	10	24,8	14	1,5	»
АМ-14 . . . . .	10	25,2	13	1,8	компенсационный
ОРФ-12 . . . . .	10,5	20,0	18	1,5	широкоугольный
М-11 . . . . .	15	17	8	1,0	Гюйгенса
АМ-27 . . . . .	15	16,8	11	1,5	ортоскопический
АМ-19 . . . . .	17	14,8	13,6	1,3	»
АМ-16 . . . . .	20	12,6	9	1,1	»

Таблица VI

## Фотографические объективы для любительских камер

Объектив	$f'$ , мм	Относительное отверстие	$2\omega$ , град	Разрешающая способность в центре, штр/мм
Спутник-4 . . . . .	20	1:4,5	92	35
МР-2 . . . . .	20	1:5,6	95	35
И-М . . . . .	23	1:3,5	68	50
И-69 . . . . .	27,6	1:2,8	56	40
Мир-5 . . . . .	28	1:2	48	35
Мир-6 . . . . .	28	1:2,5	48	35
ФЭД . . . . .	28	1:4,5	75	40
Мир-4 . . . . .	28	1:3,5	76	50
Орион-15 . . . . .	28	1:6	76	45
И-65 . . . . .	28,7	1:2,8	56	45
Уран . . . . .	35	1:2,5	63	—
Ю-12 . . . . .	35	1:2,8	63	34
И-60 . . . . .	3,5	1:2,8	50	42
МР-3 . . . . .	35	1:6,8	120	38
Мир-1 . . . . .	37	1:2,8	60	45
Т-43 . . . . .	41,7	1:4	56	35

Объектив	$f$ , мм	Относительное отверстие	$2 \omega$ град	Разрешающая способность в центре, штр/мм
И 63	45	1 2,8	50	—
T 48	45	1 2,8	52	—
T 32	45	1 3,5	52	28
Меркурий 1	50	1 2	47	42
ФЭД	50	1 2	47	25
Гелиос	50	1 2	47	35
Ю 8M	50	1 2	45	30
И 10	50	1 3,5	47	30
Ю 3	52	1 1,5	45	30
Ю 8	52	1 2	45	30
Ю 17	52	1 2	45	30
Вега 1	52	1 2,8	45	35
И 61	52,4	1 2,8	45	38
Вега 3	52,6	1 2,8	45	50
И 26	52	1 2,8	45	30
И 50	52	1 3,5	45	30
И 22	52	1 3,9	45	35
Гелиос 65	52,6	1 2	45	—
Гелиос 44	58	1 2	40	35
Мир 3	66	1 3,5	65	30
Уран 13	70	1 2,5	62	33
И 58	75	1 3,5	60	25
T 35	75	1 4	60	24
T 22	75	1 4,5	59	28
И 29	80	1 2,8	55	25
T 21	80	1 6,3	55	28
Гелиос 40	85	1 1,5	28	32
Ю 9	85	1 2	29	30
Юпитер 25	85	1 2 8	28	42
Вега 2	86	1 2,5	49	30
Уран 27	100	1 2,5	52	48
И 24	105	1 3,5	53	25
И 24M	105	1 3,5	23	30
И 7	105	1 3,5	52	30
И 56	110	1 2,5	52	25
И 23	110	1 4,5	52	25
Таир 38	133	1 4	18	—
Таир 11	135	1 2,8	18	45
Ю 11	135	1 4	19	34
И 2	135	1 4,5	50	30
T 26	135	1 6,8	52	40
Ю 6	180	1 2,8	14	35
Ю 21	200	1 4	12	40
Таир 3	300	1 4,5	8	36
Таир 7	300	1 4,5	8	42



Таблица VII

## Аэрофотографические объективы

Объектив	$f'$ , мм	Относительное отверстие	Поле зрения 2 $\omega$ , град	Разрешающая способность в центре, штр/мм
Руссар-38 . . . . .	36	1:7,7	148	31
Родина-26 . . . . .	55	1:8,2	133	
Руссар-29 . . . . .	70	1:6,8	122	
Руссар-496 . . . . .	100	1:6,8	104	47
В-1 . . . . .	100	1:6,3	86	
Руссар-30 . . . . .	120	1:7	121	
Руссар-43 . . . . .	140	1:6,8	85	33
Руссар-35 . . . . .	200	1:9	65	
Руссар-Плазmat . . . . .	200	1:6,3	65	
Орион-1 . . . . .	200	1:6,3	92	20
Индустар-37 . . . . .	300	1:4,5	46	
Индустар-55 . . . . .	300	1:4,5	46	27
Тафар-3 . . . . .	350	1:6	40	
Индустар-52 . . . . .	500	1:5	40	
Орто-Ннар . . . . .	500	1:7	29	

Таблица VIII

## Киносъёмочные объективы

Объектив	$f'$ , мм	Относительное отверстие	Поле зрения, град	Разрешающая способность в центре, штр/мм	Применяемая пленка
ОКС-1-10-1 . . . . .	10,0	1:2,8	64	—	узкая
Нева-1 . . . . .	12,0	1:1,9	28	—	узкая
Юпитер-24 . . . . .	12,5	1:1,9	28	65	узкая
Таир . . . . .	12,5	1:2,8	27	—	узкая
ОКС1-15-1 . . . . .	15,0	1:2,8	45	40	узкая
ОКС1-16-1 . . . . .	16,0	1:3,0	82	60	нормальная
ОКС1-18-1 . . . . .	18,1	1:2,8	74	65	нормальная
ОКС1-20-1 . . . . .	20,0	1:2,8	35	40	узкая
ОКС1-22-1 . . . . .	22,1	1:2,8	63	65	нормальная
РО-52-1 . . . . .	25,0	1:1,4	28	40	узкая
ОКС1-25-1 . . . . .	25,2	1:2,5	28	—	узкая
Ж-21-М . . . . .	27,8	1:2,0	56	45	нормальная
ОКС1-28-1 . . . . .	28,5	1:2,5	56	60	нормальная
ОКС2-28 . . . . .	28,0	1:4,5	89	60	широкоформатная
Ж-22М . . . . .	34,2	1:2,0	44	28	нормальная
РО-53-1 . . . . .	35,0	1:2,0	20	40	узкая
ОКС1-35-1 . . . . .	35,1	1:2,0	46	55	нормальная
ОКС2-40 . . . . .	40,0	1:3,5	69	65	широкоформатная

Объектив	$f'$ , мм	Относительное отверстие	Поле зрения, град	Разрешающая способность в центре, штр/мм	Применяемая пленка
ОКС1-40-1 . . . . .	41,1	1:2,5	40	60	нормальная
Таир-15 . . . . .	50,0	1:4,5	14	—	узкая
РО-54-1 . . . . .	50,0	1:2,0	18	—	узкая
ОКС1-50-1 . . . . .	50,3	1:2,0	30	55	нормальная
Ж-23 . . . . .	50,6	1:2,0	33	35	нормальная
ОКС1-56 . . . . .	56,0	1:3,0	52	65	широкоформатная
ОКС1-75-1 . . . . .	75,0	1:2,0	22	55	нормальная
ОКС1-75-1 . . . . .	75,0	1:2,8	9	—	узкая
Таир-13 . . . . .	75,0	1:5,6	9	—	узкая
ОКС4-75 . . . . .	75,0	1:2,8	40	—	широкоформатная
Ж-24 . . . . .	75,2	1:2,0	21	30	нормальная
ОКС1-80-1 . . . . .	80,1	1:2,0	19	55	нормальная
ОКС1-100-1 . . . . .	100,1	1:2,0	16	55	нормальная
Ж-25 . . . . .	100,2	1:2,0	15	30	нормальная
ОКС2-100 . . . . .	100,0	1:2,8	30	—	широкоформатная
ОКС-125 . . . . .	125,0	1:2,8	25	—	широкоформатная
ОКС1-150-1 . . . . .	150,0	1:2,8	10	50	нормальная
ОКС1-200-1 . . . . .	200,0	1:2,8	8,5	50	нормальная
ОКС1-300-1 . . . . .	300,0	1:3,5	6	35	нормальная

Таблица IX

## Телеобъективы

Объектив	$f'$ , мм	Относительное отверстие	Поле зрения, 2 $\omega$ , град	Разрешающая способность в центре, штр/мм
Фэд . . . . .	100	1:6,3	24	38
Телемар-22 . . . . .	200	1:5,6	13	38
МТО-350 . . . . .	350	1:5,6	5	30
Ф-3 . . . . .	400	1:4,5	31	24
Телемар-17 . . . . .	400	1:6,3	30	38
МТО-500 . . . . .	500	1:8	5	28
Телемар-2 . . . . .	750	1:6,3	32	30
Телемар-7 . . . . .	1000	1:7	24	30
МТО-100 . . . . .	1000	1:10	2,5	28
Телемар-12 . . . . .	1800	1:8	22	32

Таблица X

## Объективы для телевидения

Объектив	Фокусное расстояние $f'$ , мм	Относительное отверстие	Поле изображения $2 l$ , мм	Разрешающая способность	
				в центре	на краю
МИР-2Т . . . . .	29,0	1:2,8	30	45	16
МИР-1Т . . . . .	37,0	1:2,8	40	50	16
Юпитер-8Т . . . . .	52,4	1:2,0	40	40	20
Гелиос-40Т . . . . .	85,0	1:1,5	40	35	17
Юпитер-100Т . . . . .	100,0	1:2,5	40	38	18
Таир-1Т . . . . .	135,0	1:2,8	40	30	18
Юпитер-200Т . . . . .	200,0	1:4,0	40	38	30
Таир-3 . . . . .	300,0	1:4,5	40	35	26
ОТ-500 . . . . .	500,0	1:5,0	35	35	15
ОТ-750 . . . . .	750,0	1:5,6	40	32	16
ОТ-1000 . . . . .	1000,0	1:6,3	40	30	20

Таблица XI

## Репродукционные фотографические объективы

Объектив	$f'$ , мм	Относительное отверстие	Поле зрения $2 \omega$ , град	Разрешающая способность в центре, штр/мм	Фотопленка
ФЭД . . . . .	50	1:3,5	47	40	кинонегатив МЗ
И-50р . . . . .	60	1:5,6	40	100	Микрат
Орион 18р . . . . .	100	1:11	60	70	»
О-7 . . . . .	150	1:9	45	36	позитив
Луч-2 . . . . .	180	1:6,8	45	30	»
РИ-1 . . . . .	300	1:9	45	30	инфракром позитив
РФ-3 . . . . .	300	1:10	45	30	МЗ
РФ4 . . . . .	360	1:10	45	30	»
РК1 . . . . .	450	1:4,5	45	25	»
РФ5 . . . . .	450	1:10	45	30	»
О2 . . . . .	600	1:10	43	40	»
О2 . . . . .	750	1:10	43	40	»
О6 . . . . .	800	1:10	40	35	»
ПМ1 . . . . .	900	1:15	40	35	»
ПМ1 . . . . .	1200	1:15	40	35	»

## Проекционные объективы

Объектив	$f'$ , мм	Относительное отверстие	Поле зрения $2\omega$ , град	Область применения
PO51-3 . . . . .	20	1:2,8	41	проектор контроля деталей
PO61-4 . . . . .	28	1:2,5	56	то же
PO102-1 . . . . .	35	1:1,65	20	узкоплечная проекция
PO110-1 . . . . .	35	1:1,2	20	то же
PO59-4 . . . . .	50	1:2	34	проектор контроля деталей
PO101-1 . . . . .	50	1:1,65	14	узкоплечная проекция
PO109-1 . . . . .	50	1:1,2	14	то же
PO109-1 . . . . .	50	1:3,5	48	фотоувеличение
И-23 . . . . .	50	1:1,4	12	узкоплечная проекция
PO111-1 . . . . .	65	1:1,4	12	узкоплечная проекция
ОКП2-80-1 . . . . .	80	1:2	37	широкоплечная проекция
PO108-1 . . . . .	90	1:2	17	нормальная проекция
ОКП2-110-1 . . . . .	110	1:2	27	широкоплечная проекция
ОКП2-120-1 . . . . .	120	1:2	25	то же
PO106-1 . . . . .	120	1:2	12	нормальная проекция
8Л-82 . . . . .	125	1:2	12	стереопроекция
PO107-1 . . . . .	140	1:2,2	10	нормальная проекция
PO800-1 . . . . .	150	1:2	12	стереопроекция
Луч . . . . .	180	1:6,8	70	фотограмметрическая проекция
Орто-Ниар . . . . .	105—180	1:6,3—1:7,7	62	то же

## АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Аббе автоколлимационный окуляр	194	Внемериональный луч	72 83
— закон синусов	79	Вторичный спектр	91
— нулевой инвариант	28	Входной зрачок	59
— призма	136	— — микроскопа	157
Аберрация	71	Выходной зрачок	59
Абсолютный показатель преломле- ния	15	— — зрительной трубы	147
Абсолютный порог зрения	126	— — микроскопа	158
Автоколлимационный окуляр	192	Гельмгольца—Гюйгенса уравнение	32
Адаптация	126	Геометрическое относительное от- верстие	63
Аккомодация	126	Гиперфокальное расстояние	68
Активная коррекция	93	Главная плоскость	24
Анаморфирование коэффициент	120	Главные точки линзы	42
Анаморфозная система	120	Главные точки системы	24
Анастигмат	85	— — сложной системы	113
Апертура	157	Главный луч	58
Апертурная диафрагма	57	Глаз	124
Апертурный угол	59	— недостатки	128
Апланат	80	Глубина изображаемого простран- ства	66
Апланатизм	79	Глубина резкости	69
Апостильб	52	Гомоцентрический пучок	12
Апохромат	93	Дальнорезкий глаз	128
Астигматизм	83	Дальняя точка ясного зрения	126
— плоскопараллельной пла- стинки	130	Дахпризмы	135
Астигматическая разность	84	Диаскопическая проекция	183
Астигматический пучок	13	Диафрагма апертурная или дейст- вующая	57
Афокальная цилиндрическая при- ставка	122	Диафрагма полевая или поля зре- ния	60
Ахроматический объектив	9, 139	Диафрагменное число	63
Базис глазной	127	Диоптрия	115
Бека осветительная система микро- скопа	161	Дисперсия	17
Бинокль призмный	135	Дисторсия абсолютная или оптиче- ская	86
Бинокулярное зрение	127	Дисторсия фотограмметрическая	87
Ближняя точка ясного зрения	126	Единицы фотометрических величин	50
Близорукий глаз	128	Естественная перспектива	49
Визуальная коррекция	93	Желтое пятно	121
— система	73		
Виньетирование	61		

Ближнее фокусное расстояние . . . . .	25	Коэффициент пропускания . . . . .	53
Закон косинусов для освещенности поверхности . . . . .	52	— светорассеяния . . . . .	167
Закон независимости распростране- ния лучей . . . . .	14	— телеобъектива . . . . .	168
Закон преломления . . . . .	15	Кривизна поверхности изображения	85
— прямолинейного распростра- нения света . . . . .	14	Критический угол прзмы . . . . .	131
Закон синусов Аббе . . . . .	79	Кружок рассеяния . . . . .	76
Зеркало параболическое . . . . .	182	Лагранжа—Гельмгольца уравнение	34
— плоское . . . . .	130	Лигоцкого—Штебле условие изо- планатизма . . . . .	80
— эллиптическое . . . . .	110	Линза . . . . .	44
Зеркальная система . . . . .	171, 183	— бесконечно тонкая . . . . .	112
Зеркально-линзовая система . . . . .	174	— гиперболическая . . . . .	46
Зрачок глаза . . . . .	127	— гиперхроматическая . . . . .	93
Зрение одним глазом . . . . .	128	— концентрическая . . . . .	45
Зрение стереоскопическое . . . . .	128	— мениск . . . . .	44
Зрительная труба Галлеля . . . . .	148	— шар . . . . .	45
— — Кеплера . . . . .	147	— цилиндрическая . . . . .	14
Зрительный пурпур . . . . .	126	— эллиптическая . . . . .	46
Идеальная оптическая система . . . . .	106	Лупа . . . . .	155
Изображение . . . . .	13, 107	Лупы поля зрения . . . . .	155
— действительное . . . . .	13	— увеличения . . . . .	155
— мнимое . . . . .	13	Люкс . . . . .	51
Изопланатизм . . . . .	80	Люмен . . . . .	51
Иммерсия . . . . .	158	— на квадратный метр . . . . .	52
Инвариант нулевой . . . . .	28	Масштаб изображения . . . . .	49
Индустар . . . . .	92, 168	Мениск . . . . .	44
Интегральная чувствительность . . . . .	191	Меридиональная плоскость . . . . .	20
Исправление недостатков глаза . . . . .	128	Меридиональные лучи . . . . .	83
Источник света . . . . .	12, 197	Миопический глаз . . . . .	128
Истинческая поверхность . . . . .	76	Микроскоп . . . . .	156
Качество изображения . . . . .	74	— осветитель . . . . .	160
Келера осветительное устройство	160	Миры . . . . .	95
Кинопроекция . . . . .	184	Мнимое изображение . . . . .	13
Клиновидная линза . . . . .	38	Наилучшего зрения расстояние . . . . .	126
Кольца . . . . .	124	Наименьшее разрешаемое расстоя- ние . . . . .	94
Коллектив . . . . .	139	Нейман—Кетслера формула . . . . .	16
— окуляра . . . . .	143	Несферические поверхности . . . . .	19, 39
Коллиматор . . . . .	188	Нит . . . . .	50
Комма . . . . .	80	Нулевой инвариант Аббе . . . . .	28
— меридиональная . . . . .	80	Нулевые лучи . . . . .	21
Конденсор . . . . .	175	Ньютона формула . . . . .	110
Конденсоры микроскопов . . . . .	161	Оборачивающие линзовые системы . . . . .	150
Контраст изображения . . . . .	167	— призмные системы . . . . .	135
Концентрическая линза . . . . .	45	Объективы апохроматы . . . . .	92
Коробочная оптическая система . . . . .	21	— ахроматы . . . . .	91
Косые лучи (внемеридиональные лу- чи) . . . . .	72, 83	— зрительной трубы . . . . .	139
Конъюнктив . . . . .	125	— кинопроекционные . . . . .	186, 204
Коэффициент анаморфирования . . . . .	39, 120	— киносъемочные . . . . .	201
Коэффициент трансформирова- ния . . . . .	39, 120	— микроскопов . . . . .	163, 198
Коэффициент виньетирования . . . . .	62	Окуляр автоколлимационной Гаусса	192
— дисперсии . . . . .	17	— Гюйгенса . . . . .	143
— отражения . . . . .	53	— Кельнера . . . . .	144
— поглощения . . . . .	53	— компенсационный . . . . .	199
— призмы . . . . .	132	— микроскопа . . . . .	144
— прозрачности . . . . .	53	— ортоскопический . . . . .	144
		— Рамсдена . . . . .	145
		— симметричный . . . . .	144

Окуляр с удаленным зрачком . . . . .	144	Призма крышеобразная . . . . .	135
— широкоугольный . . . . .	144	— пента . . . . .	134
— Эрфле . . . . .	144	— Пехана . . . . .	136
Опак иллюминатор . . . . .	160	— полупента . . . . .	134
Оптическая коррекция . . . . .	93	— Шмидта . . . . .	134
— ось . . . . .	21	Продольная сферическая аберрация	76
— сила . . . . .	115	Продольное увеличение . . . . .	111
— система . . . . .	20	Проекционная система . . . . .	114, 83
Оптические постоянные стекла . . . . .	18	Проекционное расстояние . . . . .	184
Оптический инвариант . . . . .	15	Проекционные объективы . . . . .	186, 204
Оптический метод трансформирования	123	Проекционный прибор диаскоп . . . . .	184
Орто-Ниар . . . . .	85	— — эпидиаскоп . . . . .	184
Ортоскопическая система . . . . .	86	— — эпископ . . . . .	184
Осветительная система Бека . . . . .	161	Просветление . . . . .	55
— — Келера . . . . .	160	Прямоугольная призма . . . . .	132
Освещенности единица . . . . .	51	Пучок лучей . . . . .	12
Освещенность . . . . .	51	Радужная оболочка . . . . .	124
— изображения . . . . .	62, 64	Разрешаемое расстояние . . . . .	94
Острота зрения . . . . .	127	Разрешающая способность глаза	127
— — стереоскопического . . . . .	128	— — зритель-	
Относительное отверстие . . . . .	63	ной трубы . . . . .	150
Отражения законы . . . . .	15	Разрешающая способность объек-	
Палочки глаза . . . . .	124	тива . . . . .	94
Параксиальные лучи . . . . .	21	Разрешающая способность микро-	
Параллактический угол . . . . .	128	скопа . . . . .	159
Переднее фокусное расстояние . . . . .	25	Разрешающая способность фотооб-	
Плоская поверхность . . . . .	36	ъектива . . . . .	165
Плоскопараллельная пластинка . . . . .	129	Ракурсный метод трансформирова-	
Плоскость главная . . . . .	24	ния . . . . .	123
— изображения . . . . .	33	Рамсдена окуляр . . . . .	145
— предметов . . . . .	33	Редуцирование . . . . .	129
Показатель преломления абсолютный	15	Ретина . . . . .	124
— — относительный . . . . .	15	Роговая оболочка . . . . .	124
Поле зрения . . . . .	65	Руссар . . . . .	61, 166, 201
— — зрительной трубы 148, 150		Сагиттальная плоскость . . . . .	72
— — лупы . . . . .	155	Сагиттальные лучи . . . . .	72
— — микроскопа . . . . .	158	Светность . . . . .	52
— — фотообъектива . . . . .	164, 165	Световая чувствительность глаза . . . . .	126
Полезное увеличение зрительной		Световой поток . . . . .	51
трубы . . . . .	150	— луч . . . . .	12
Полезное увеличение микроскопа	159	Светосила геометрическая . . . . .	63
Полигмар . . . . .	168	— физическая . . . . .	63
Полное внутреннее отражение . . . . .	132	Светосильные объективы . . . . .	165
Поперечная сферическая аберрация	77	Светящаяся точка . . . . .	12
Пороговая яркость . . . . .	127	Свеча . . . . .	50
Порро система . . . . .	135	Сетка . . . . .	129
Постоянные оптических стекол . . . . .	18	Сетчатая оболочка . . . . .	124
Потери света на отражение . . . . .	53	Сила света . . . . .	50
— — поглощение . . . . .	53	Симметричный окуляр . . . . .	144
Правило знаков . . . . .	21	Система Галилея . . . . .	147
Предельный угол полного внутрен-		— двоякой симметрии . . . . .	21
него отражения . . . . .	131	— Кеплера . . . . .	147
Преломляющий угол клина . . . . .	38	— косоуголая . . . . .	21
Призма Аббе . . . . .	136	— круговой симметрии . . . . .	21
— башмачная . . . . .	136	— оптическая . . . . .	20
— дальномера . . . . .	136	— телескопическая . . . . .	114, 147
— Дове . . . . .	133, 135	— центрированная . . . . .	20
— куб . . . . .	136	Склера . . . . .	124
		Слепос пятно . . . . .	121

Сопряженные точки, линии, плоскости . . . . .	107	Угол поля зрения . . . . .	60
Сосудистая оболочка . . . . .	124	— изображения . . . . .	60
Спектральная чувствительность . . . . .	127	— сходимости . . . . .	176
Спектр вторичный . . . . .	91	Уравнение нулевого луча . . . . .	28
Спектроскоп автоколлимационный . . . . .	193	— углов нулевого луча . . . . .	29
Стерadian . . . . .	51	Фокальная плоскость . . . . .	25
Стереоскопическое зрение . . . . .	128	Фокус системы второй (задний) . . . . .	23
Стигматическое изображение . . . . .	13	— системы первый (передний) . . . . .	23
Сферическая aberrация . . . . .	75	Фокусные расстояния . . . . .	25
Схемы вычисления лучей . . . . .	43, 103, 104	Фокусы отрезков . . . . .	110, 111
Телеобъективы . . . . .	168	Фотографическая система . . . . .	114, 163
Телескопическая линза . . . . .	46	— коррекция . . . . .	93
— система . . . . .	114, 147	Хроматизм положения . . . . .	90
Телемар . . . . .	170, 202	— увеличения . . . . .	93
Телесный угол . . . . .	51	Хроматическая aberrация . . . . .	89
Темновой порог раздражения . . . . .	126	— разность сферических aberrаций . . . . .	92
Тессар . . . . .	168	Хрусталик глаза . . . . .	124
Тип объектива . . . . .	168	Центрированная система . . . . .	20
Тонкая линза . . . . .	112	Цилиндрическая линза . . . . .	14
Торическая поверхность . . . . .	19	Число Аббе . . . . .	18
Точечное изображение . . . . .	13	Числовая апертура . . . . .	158
Трансформирования коэффициент . . . . .	39, 120	Чувствительность глаза . . . . .	126
Труба зрительная . . . . .	147	Широкоугольные объективы . . . . .	165
Тубуса микроскопа механическая длина . . . . .	159	Широкоугольный окуляр . . . . .	144
Увеличение видимое . . . . .	48	Шмидта призма . . . . .	134
— зрительной трубы . . . . .	149	Штебле—Лигоцкого условия . . . . .	80
— линейное . . . . .	23	Эллиптическая линза . . . . .	46
— лупы . . . . .	155	Эллиптическое зеркало . . . . .	110
— микроскопа . . . . .	157	Эпидиаскоп . . . . .	184
— окулярное . . . . .	155	Эппроекция . . . . .	183
— полезное . . . . .	150, 159	Эпскоп . . . . .	183
— поперечное . . . . .	23	Эрфле окуляр . . . . .	144
— продольное . . . . .	111	Эффективное относительное отверстие . . . . .	165
— угловое . . . . .	35	Яркость . . . . .	50
Угол конвергенции . . . . .	127	— единица . . . . .	50
— отклонения . . . . .	38		
— охвата . . . . .	176		



## ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Глава первая.</i> Введение		
§ 1.	Значение и роль оптических приборов . . . . .	3
§ 2.	Краткий исторический очерк развития оптических приборов . . . . .	5
§ 3.	Предмет геометрической оптики . . . . .	11
<i>Глава вторая.</i> Основные положения геометрической оптики		
§ 4.	Светящаяся точка, световые лучи и пучки . . . . .	12
§ 5.	Законы, лежащие в основе геометрической оптики . . . . .	14
§ 6.	Показатель преломления . . . . .	15
§ 7.	Дисперсия света . . . . .	17
<i>Глава третья.</i> Образование оптических изображений		
§ 8.	Преломляющие и отражающие поверхности . . . . .	19
§ 9.	Система поверхностей и нулевые лучи . . . . .	20
§ 10.	Правило знаков . . . . .	21
§ 11.	Линейное увеличение . . . . .	23
§ 12.	Главные точки и фокусные расстояния . . . . .	26
§ 13.	Преломление лучей сферической поверхностью . . . . .	32
§ 14.	Уравнение Гюйгенса—Гельмгольца . . . . .	35
§ 15.	Угловое увеличение . . . . .	35
§ 16.	Преломление луча плоской поверхностью . . . . .	36
§ 17.	Преломление луча через плоскопараллельную пластину . . . . .	38
§ 18.	Преломление луча через клин . . . . .	39
§ 19.	Преломление луча несферической поверхностью . . . . .	42
§ 20.	Преломление луча через линзу . . . . .	44
§ 21.	Типы линз . . . . .	44
<i>Глава четвертая.</i> Общие свойства оптических систем		
§ 22.	Основные характеристики оптического прибора . . . . .	48
§ 23.	Видимое увеличение . . . . .	49
§ 24.	Основные фотометрические понятия . . . . .	53
§ 25.	Потери света . . . . .	57
§ 26.	Диафрагмы и их значение . . . . .	60
§ 27.	Виньетирование . . . . .	62
§ 28.	Светосила . . . . .	64
§ 29.	Освещенность по полю изображения . . . . .	65
§ 30.	Поле зрения . . . . .	66
§ 31.	Глубина изображаемого пространства . . . . .	69
§ 32.	Глубина резкости . . . . .	69
<i>Глава пятая.</i> Качество изображения оптических систем		
§ 33.	Роль aberrаций в образовании изображений . . . . .	71
§ 34.	Сферическая aberrация . . . . .	79
§ 35.	Отступление от закона синусов . . . . .	80
§ 36.	Кома . . . . .	81
§ 37.	Астигматизм . . . . .	81
§ 38.	Дисторсия . . . . .	81

§ 39	Хроматическая аберрация	89
§ 40	Разрешающая способность	94
§ 41	Вычисление двухлинзового склеенного объектива	96
<i>Глава шестая</i>	<i>Теория идеальной оптической системы</i>	
§ 42	Идеальная оптическая система	106
§ 43	Построение изображения	107
§ 44	Зависимости между положениями предметов и их изображений	108
§ 45	Продольное увеличение	111
§ 46	Тонкая линза и система тонких линз	112
§ 47	Оптическая сила системы	115
§ 48	Формула углов	116
§ 49	Оптическая сила двух систем	116
§ 50	Наклонные плоскости предметов и изображений	118
§ 51	Анаморфозные системы	119
<i>Глава седьмая</i>	<i>Оптические системы приборов</i>	
§ 52	Глаз	124
§ 53	Оптические детали	129
§ 54	Телескопические системы	147
§ 55	Лупа и микроскоп	155
§ 56	Фотографический объектив	163
§ 57	Осветительные системы	175
§ 58	Проекционные системы	183
§ 59	Коллиматоры и автоколлиматоры	188
<i>Рекомендуемая литература</i>		196
<i>Приложения</i>		197
<i>Алфавитный указатель</i>		205

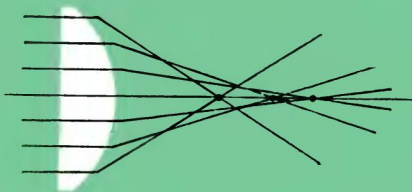
---

## Замеченные опечатки

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
67	10 снизу	$\frac{\delta'}{\delta} = -\frac{f'}{f}$	$\frac{\delta'}{\delta} = -\frac{f'}{p}$
111	5 сверху	$a' = (1 - \beta) i'$	$a' = (1 - \beta) f'$
139	18 сверху	$b = -\frac{d}{2n}$	$b = -\frac{d}{2n}$
165	2 снизу	$\frac{D}{1,22 \lambda f'}$	$\frac{D}{1,22 \lambda f'}$
172	21 сверху	$d_2 =$	$a_2 =$
179	15 снизу	$\left( \frac{\alpha_{k+1} - \alpha_k}{\mu_{k+1} - \mu_k} \right)^3$	$\left( \frac{\alpha_{k+1} - \alpha_k}{\mu_{k+1} - \mu_k} \right)^2$
191	10верху	$\frac{F_0 \tau \sigma^2}{16n l_0^2}$	$\frac{F_0 \tau \sigma^2}{16n^2 l_0^2}$

Б. Н. БЕГУНОВ

# ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА



1966