

Б. Н. БЕГУНОВ ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Б. Н. БЕГУНОВ



ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ
ОПТИКА

Б. Н. БЕГУНОВ

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА



ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
1961

Печатается по постановлению
Редакционно-издательского совета
Московского университета

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Настоящий курс «Геометрическая оптика» автор читал студентам III курса физического факультета Московского ордена Ленина государственного университета имени М. В. Ломоносова в течение 1950—1961 гг.

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

В книге освещены новые вопросы: преломление лучей через несферические поверхности, основные сведения об анаморфозных системах, метод вычисления ахроматического двухлинзового объектива, влияние отражающих призм на поле зрения, основы расчета габарита сложной телескопической системы, расчет простых конденсоров, освещенность изображения в различных видах оптических систем, устройства оптических систем фотореле и др.

В книге уделено много места практическим применениям знаний основ геометрической оптики в вопросах расчета и конструирования оптических систем. Схемы расчетов, числовые примеры и таблицы помогут студентам при решении конкретных практических задач.

Глава первая

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 непосредственно расположены перед ним и на сравнительно близком расстоянии: у далеко расположенных предметов человек не может различить отдельные детали. Глаз не видит в темноте.

Оптические приборы, созданные человеком, необычайно расширили возможности зрения. Приборы перископического типа позволяют наблюдать процессы, происходящие в помещениях, недоступных для человека из-за специфических условий, созданных в них и вредных для здоровья. 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 рассматривания 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 ближайшие к Земле планеты и наблюдают процессы, происходящие на поверхности Солнца.

Приборы подобного рода, позволяющие рассматривать далеко расположенные предметы и называемые *телескопическими приборами*, весьма разнообразны. Среди них приборы для измерения координат летающих целей, такие, как дальномеры и высотомеры, большая группа геодезических приборов:

нивелиров, теодолитов и т. п., позволяющих 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 микрона. Микроскоп применяется в различных отраслях науки и техники, в частности для контрольно-измерительных целей в виде компараторов, толщешеров, 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 документально 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 киносъемочных камер, осветительных приборов, приборов копировки фильмов, кинопроекционных аппаратов применяются в процессе создания кинофильма.

Киносъемочные и проекционные устройства позволили осуществить стереоскопическое безочковое и поляридное кино. Развитие оптических средств обусловило появление широкоэкранного и панорамного кинематографов.

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 вещества, составляющего всего 0,0001%.

Использование фотоэлектрического эффекта позволило создать большую группу *фотоэлектрических приборов* контроля автоматических процессов в различных отраслях народного хозяйства. Широко применяются специальные оптические устройства фотореле, фототелеграфных и фотогравировальных машин, светозаписи звуковых колебаний и т. п. В телемеханических и электроизмерительных 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.

Приборы, использующие принцип интерференции, позволяют определять качество изображения оптических систем, качество обработки различных поверхностей с точностью до долей микрона, измерять очень малые расстояния. Такие приборы называются *интерференционными*.

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, металлогра-

фический 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.

Трудно найти такие отрасли техники, в которых оптические приборы не помогли бы решать различные задачи, которые невооруженный глаз решить не в состоянии.

§ 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 (умер в 322 г. до н. э.) объяснил сущность зрения. Хотя многие теоретические положения древних философов, а позднее и ученых средних веков, были недостаточны, порой просто ошибочны, тем не менее они способствовали развитию правильных взглядов на оптические явления и созданию различных оптических приборов.

Старейшие оптические приборы — это лупа и очки.

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

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 цве-

* Ф. Энгельс. Диалектика природы. ГИПЛ, 1952.

тов. В 1704 г. вышла из печати работа Ньютона «Оптика или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света».

В России очки и зрительные трубы появились в начале XVII века, а в середине XVII века 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 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).

Автор трактата «О происхождении света» (1756), в котором излагается механика световых колебаний эфира на основе волновой теории, 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 организуется оптическая мастерская, изготовлявшая главным образом оптические приборы для нужд российского флота.

Крупным событием в развитии оптического приборостроения был пуск первого завода оптического стекла в Баварии (П. Гинан, 1805 г.).

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

В середине XIX века в работах по оптике принимают участие видные ученые Петербургского, Московского и других университетов. Масштабы работ становятся все шире.

Профессор Казанского университета, известный математик Н. 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 приборов», в которой обосновал теорию поля зрения зрительных труб системы Галлилея.

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. «глухой 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 века ознаменовывается изобретением новых источников света. В 1876 г. П. Н. Яблочков берет патент на электрическую свечу, а за три года до этого, в 1873 г., А. Н. Лодыгин демонстрирует первую лампу накаливания. 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 века 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 прикладное значение.

Работы академика Д. С. Рождественского (1876—1940) в области аномальной дисперсии света в парах натрия и разработанный им интерференционный метод количественного изучения аномальной дисперсии в парах, так называемый «метод крюков» (1912), принесли ему мировую славу.

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. Данные об оптических производствах России собраны в табл. 1 в приложении.

Октябрьская революция открыла новую страницу в развитии русской науки. Наука приобрела значение важного государственного дела. На ее развитие государство стало отпускать значительные средства. Широко 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 призванный решать различные научные и технические проблемы 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.).

Расширение оптических производств потребовало новые кадры, в связи с чем были организованы специальные факультеты в ряде вузов для подготовки специалистов в области оптики: оптико-механические факультеты ЛИТМО, МИИГАНК и МВТУ. Большой вклад в дело подготовки оп-

тиков 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, Н. Н. Качалов — за книгу «Основы процессов шлифовки и полировки стекла», С. И. Вавилов, В. П. Левшин, М. А. Константинова, В. А. Фабрикант, Ф. А. Бутаева и В. И. Долгополов — за разработку люминесцентных ламп.

Роль ГОИ в развитии оптики в Советском Союзе огромна. Правительство отпускало и отпускает значительные средства институту на приобретение различного оборудования. Институт непрерывно оснащается наиболее современными приборами и оборудованием, получает новые помещения для лабораторий.

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 стекло-

варения перед институтом были поставлены практические задачи по развитию опtotехнических 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 — старейшим сотрудником института, руководителем вычислительного отдела ГОИ.

В опtotехническом 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 перебазируется 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 стремления 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 для исследования в вакууме, светосильные спектральные приборы, приборы большой дисперсии и разрешающей способности, интерференционные спектральные приборы, спектральные приборы для визуаль-

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

ных наблюдений, спектрофотометры, приборы для инфракрасной области спектра и др.

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

§ 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. С развитием оптики понятие ее предмета охватывало различные теоретические и практические положения, вытекающие из изучения природы света и световых явлений.

Оптика разделяется на физическую и геометрическую. Изучение природы света и явлений света, таких, как интерференция, дифракция, поляризация и др., является предметом 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 оптических приборов предполагает учет теоретических положений физической оптики.

Глава вторая

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

§ 4. Светящаяся 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 источником света.

В геометрической оптике под лучом света понимают ось световой трубки, в то время как в физическом смысле, луч света есть 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 аберраций оптической системы превращаются в негомоцентрические, причем нарушение гомоцентричности наступает после преломления или отражения на первой же поверхности (кроме особых случа-

ев безабберационных поверхностей для данного пучка лучей). Пучки лучей бывают расходящиеся (рис. 1,а), сходящиеся (рис. 1,б) и параллельные (рис. 1,в).

Гомоцентрический пучок лучей образует одну точку изображения. Такое изображение называется *точечным* или *стигматическим*. Изображение, образованное пересечением самих лучей, называется *действительным*, а изображение,

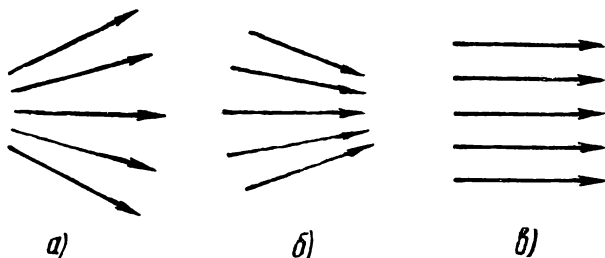


Рис. 1. Пучки лучей

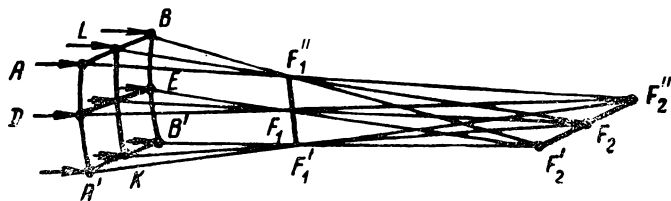


Рис. 2. Астигматический пучок лучей

образованное пересечением их геометрических продолжений, — *мнимым*.

На малую часть сферической 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.

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

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 перпенди-

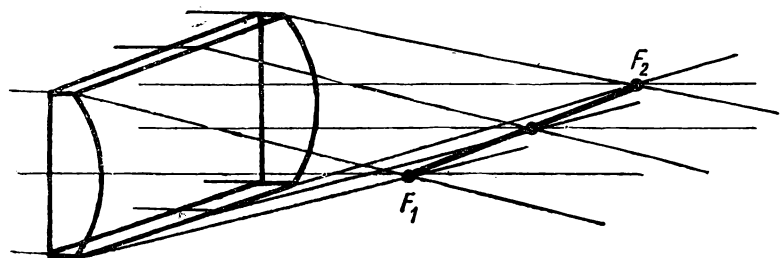


Рис. 3. Астигматический пучок, образованный цилиндрической линзой

кулярном к поверхности, то астигматический пучок не образуется, так как кривизны этой поверхности в двух взаимноперпендикулярных направлениях одинаковы. В этом случае гомоцентрический пучок после преломления, переставая быть гомоцентрическим, образует каустическую поверхность.

На поверхность (рис. 4) падает параллельный пучок лучей. Вследствие сферической aberrации, которая будет подробно рассмотрена позднее, преломленные лучи не соберутся в одной точке на оси OO' . Чем выше от оси будут падать лучи, тем ближе к поверхности они будут пересекать ось OO' .

Если рассмотреть главное сечение (плоскость рисунка) объемного тела, то получим линию ACB , огибающую поверхность. Вращением этой линии вокруг оси OO' получим каустическую поверхность. В действительности каустические поверхности бывают самой разнообразной формы.

Уничтожение каустических поверхностей в изображении

является задачей вычислительной оптики. Световая энергия в плоскости изображения распределяется на значительную часть сечения каустической поверхности, перпендикулярную оси. Тем самым нарушается образование точечного изображения.

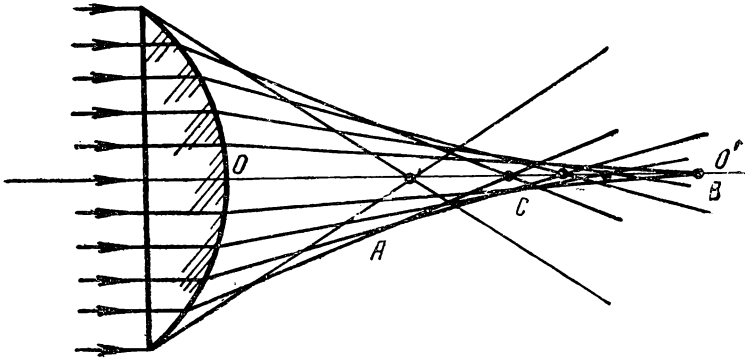


Рис. 4. Сечение каустической поверхности

§ 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 одним из оснований геометрической оптики. Опыт также показал, что закон прямолинейного распространения света несправедлив в случае прохождения лучей вблизи задерживающих экранов. Здесь мы встречаемся с явлением дифракции, получившей 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 будет искажать 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 освещен-

ность 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.

Эти 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 вычислить ход луча через любую сложную оптическую систему. В-третьих, они указывают на возможность анализа оптических систем в обратном ходе лучей.

Все оптические среды характеризуются абсолютным показателем преломления n , который называется просто *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, ра-

вен единице. Обозначим угол падения луча через i , а угол преломления через i' . Показатель преломления первой среды n , а второй — n' , тогда

$$n \sin i = n' \sin i' \quad (5,1)$$

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 $n=1,000\ 274$ (при нормальном давлении 760 мм рт. ст. и температуре 20° С).

Зависимость показателя преломления воздуха от температуры t в °С и атмосферного давления P_δ определяется формулой:

$$n_{\text{в}} = 1 + 0,000294 \frac{P_\delta}{760} \cdot \frac{1}{1 + \frac{t}{273}} \quad (5,2)$$

Вычисление показателя преломления воздуха часто для практических целей необходимо производить с точностью 10^{-6} .

Пример 1. Луч идет из воздуха в плоскопараллельную пластинку под углом 30°. Пластинка имеет показатель преломления 1,5163. Определить угол преломления луча в пластинке.

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

Применим формулу (5, 1):

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

или

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

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

§ 6. Полное внутреннее отражение

Если луч идет из среды оптически более плотной в среду менее плотную, то преломленный луч отдалается от перпендикуляра и в пределе угол преломления равен 90° . Соответствующий ему угол падения называется предельным *углом полного внутреннего отражения*.

Из формулы (5, 1) следует, что синус предельного угла полного внутреннего отражения равен:

$$\sin i_m = \frac{n'}{n}. \quad (6,1)$$

Если луч идет из стекла в воздух, то формула предельного угла полного внутреннего отражения примет вид:

$$\sin i_m = \frac{1}{n}. \quad (6,2)$$

Очевидно, что лучи, падающие на поверхность раздела двух оптических сред под углами большими чем угол, определяемый из уравнения (6,2), полностью отразятся от этой поверхности.

С этим явлением особенно часто приходится встречаться в призмах. Отражающие грани призм предназначены для полного отражения падающих на них лучей. Если угол падения луча на отражающую грань меньше предельного угла полного внутреннего отражения, то такая грань должна быть посеребрена, что исключает возможность преломления на этой поверхности.

Для призм обычно выбирают сорта оптических стекол К8 с $n = 1,5163$ и БК10 с $n = 1,5688$. Для этих сред имеют соответственно $i_m = 41^\circ 15' 42''$ и $i_m = 39^\circ 36' 01''$

Если на призму (рис. 5) падает луч перпендикулярно к входной поверхности, то отражающую поверхность он встречает под углом α .

В частном случае прямоугольной призмы $\alpha = 45^\circ$, 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 $i_1 \neq 90^\circ$, 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. 5) получим:

$$i'_1 = \alpha - i_m$$

или

$$\sin i_1 = n \sin(\alpha - i_m). \quad (6,3)$$

Для прямоугольной призмы ($\alpha=45^\circ$) из стекла сорта К8 $i_1 = 5^\circ 40' 06''$, а из стекла БК10 $i_1 = 8^\circ 28' 16''$.

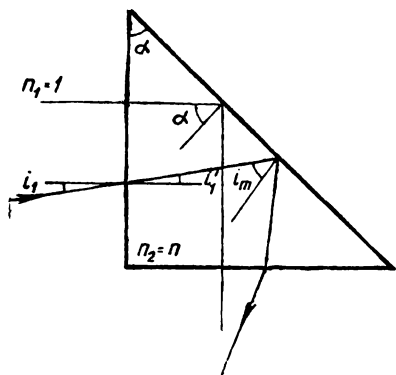


Рис. 5. Явление полного внутреннего отражения в прямоугольной призме

Удвоенная величина этих углов дает представление об угловом поле зрения того участка оптического прибора, в котором размещена призма, которое не требует серебрения отражающей поверхности.

Пример 2. 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 (6, 1):

$$n' = n \sin i_m = 1,6126.$$

§ 7. Дисперсия света

Представим себе, что белый солнечный луч BP (рис. 6) 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 является составным лучом из ряда лучей, с различной длиной волны, и эти лучи преломятся по-разному, образуя веер лучей в пределах угла di' .

Для определения угловой величины дисперсии воспользуемся формулой закона преломления:

$$n \sin i = n' \sin i'.$$

Продифференцируем по переменным n' и i' при постоянных n и i . Получим:

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

Отсюда

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

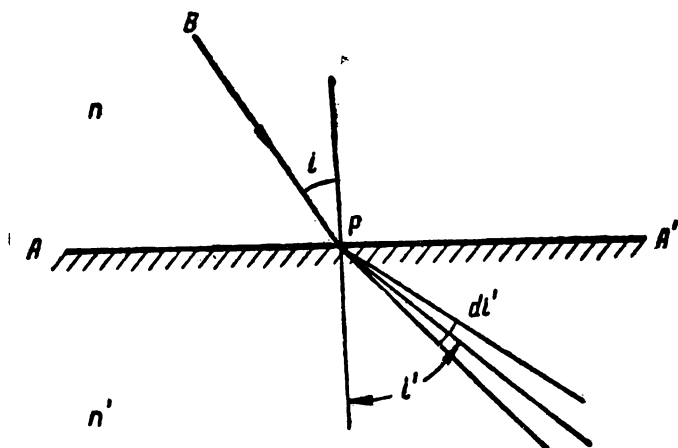


Рис. 6. Дисперсия света

Под dn' понимают разность показателей преломления для лучей, расположенных на краях изучаемого участка спектра, а под n' — показатель преломления для среднего 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 (5,1).

Пример 3. Определить угловую дисперсию оптического стекла с $n' = 1,6893$, если в диапазоне длин волн от 365 мкм до 950 мкм разность показателей преломления составляет 0,08185. Угол падения луча на поверхность призмы $57^{\circ}38'04''$.

Решение. Определим угол преломления по формуле (5,1):

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

Угловую дисперсию найдем по формуле (7,1):

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

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

Способность стекла разлагать свет на составные части характеризуется *коэффициентом дисперсии* ν :

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

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 ν являются главными оптическими постоянными оптических стекол. Значения этих постоянных для некоторых оптических стекол приведены в табл. 2 приложения.

Оптическое стекло пропускает излучение в диапазоне длин волн 0,3—2,7 *ммк*.

Глава третья

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. 7, 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 получим *цилиндрическую* поверхность (рис. 7, 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. 7, в) и $R < r$ (рис. 7, г).

В обоих случаях образуются *торические* поверхности.

В торических поверхностях имеем два главных сечения, повернутых друг от друга на 90° , в которых действуют как бы сферические поверхности с радиусами кривизны r и R .

Применяются и другие *несферические* поверхности тел вращения. Наиболее часто встречаются поверхности второго порядка: эллипсоид, гиперболоид и параболоид вращения.

Несферические поверхности, удовлетворяющие уравнениям высших порядков, применяются в осветительных системах и в объективах в тех случаях, когда необходимо получить особенно хорошее исправление аберраций.

Несферические поверхности позволяют теоретически получить хорошее исправление аберраций. Так, двухлинзовый конденсор с одной несферической поверхностью дает лучший,

в абберационном отношении, результат, чем шестилинзовый сферический. Но изготовление несферических поверхностей, а в особенности контроль качества их изготовления, весьма затруднен.

Торические поверхности находят себе применение в очковой оптике, параболические — в отражателях, поверхности эллипсоида вращения — в конденсорах и отражателях.

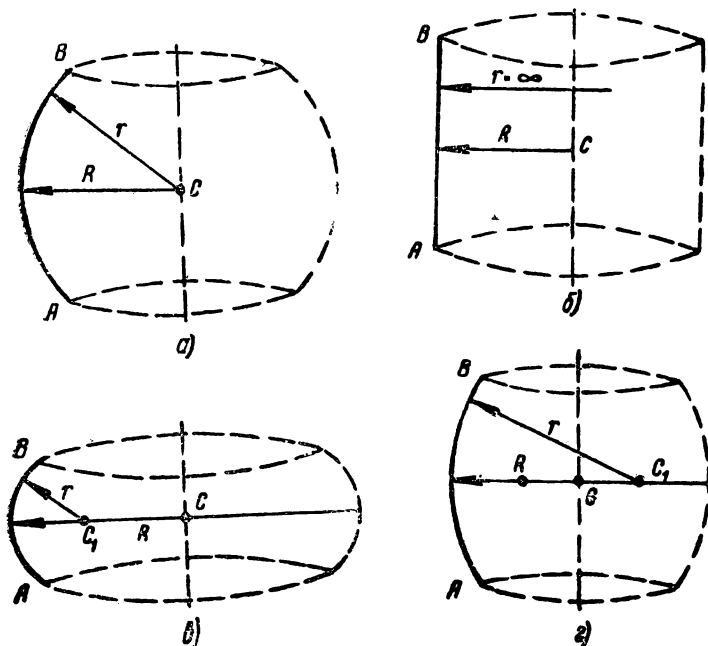


Рис. 7. Виды поверхностей

§ 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. Они или позволяют получить оптическое изображение, или помогают осветить тот или иной объект, или позволяют рассматривать через них различные предметы. 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. 8. Если центры сферических поверхностей расположены на одной прямой, то такая система называется *центрированной*.

Преобладающая часть оптических приборов имеет центрированные оптические системы, рассмотрению которых и посвящается дальнейшее изложение.

Прямая, соединяющая центры всех сферических поверхностей, называется *оптической осью* системы. Очевидно, что

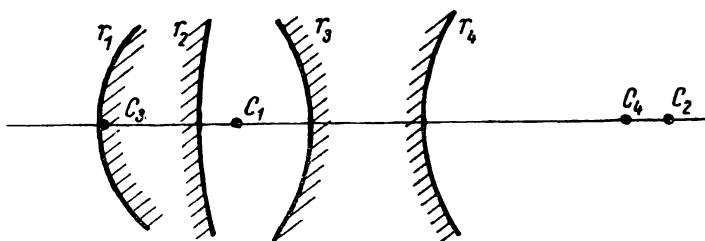


Рис. 8. Центрированная оптическая система

луч, проходящий вдоль оптической оси, проходит все поверхности без преломления.

Для удобства вывода различных оптических законов 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*.

Законы, выведенные для этой области на основе нулевых лучей, имеют простую математическую форму. Но они 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 направления света слева направо.

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

1. Линейные отрезки по оси считаются положительными, если их направление от оптической системы совпадает с на-

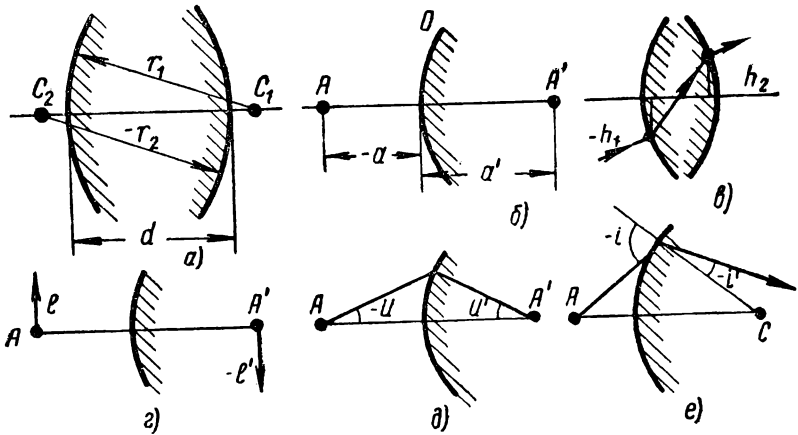


Рис. 9. Знаки отрезков и углов

правлением света, и отрицательными, если они направлены в противоположную сторону (рис. 9, б).

2. Радиус кривизны поверхности считается положительным, если центр кривизны находится справа от поверхности, и отрицательным, если центр кривизны находится слева от поверхности (рис. 9, а).

3. Величины толщин и воздушных промежутков между преломляющими поверхностями d всегда считаются положительными (рис. 9, а).

4. Величины предметов и изображений l и l' и высоты пересечения лучей на поверхностях h считаются положительными вверх от оптической оси и отрицательными вниз от нее (рис. 9, в, г).

5. Угол луча с оптической осью считается положительным, если для совмещения оси с лучом ось нужно вращать по ча-

совой стрелке, и отрицательным, если ось нужно вращать против часовой стрелки (рис. 9, *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. 9, *е*).

Знак плюс при обозначениях опускается.

7. При отражении на поверхности изменяется знак у угла отражения i' , показателя преломления n' и величины расстояния между отражающей поверхностью и следующей.

§ 11. Преломление лучей сферической поверхностью

Сферическая поверхность O с радиусом кривизны r (рис. 10) разделяет две оптические среды с показателями преломления n и n' . Предмет расположен в точке A на рас-

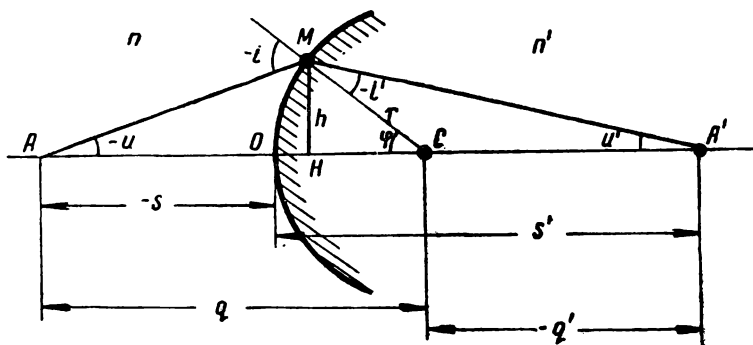


Рис. 10. Сферическая преломляющая поверхность

стоянии s^* перед поверхностью, 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 зна-

ков. Сферическая поверхность O разделяет два пространства, пространство предметов (в котором расположены предметы) и пространство изображений.

Начальными данными для вычисления преломления луча на поверхности являются: 1) расстояние предмета от поверхности — s ; 2) угол u , под которым луч направляется на поверхность.

Для вычисления 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. 10 следует:

$$q = r - s. \quad (11,1)$$

Из тр-ка AMC по формуле синусов имеем:

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

или

$$\sin i = \frac{q \sin u}{r}. \quad (11,2)$$

Угол преломления i' найдем из закона преломления (5,1):

$$\sin i' = \frac{n \sin i}{n'}. \quad (11,3)$$

Из тр-ка AMC имеем:

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

а из тр-ка CMA' :

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

Отсюда

$$u' = u + i' - i. \quad (11,4)$$

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

$$q' = \frac{r \sin i'}{\sin u'}. \quad (11,5)$$

и, наконец:

$$s' = r - q'. \quad (11,6)$$

Все вышеуказанные формулы (11,1) — (11,6) 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 первой поверхности будет являться точкой предмета для второй поверхности и т. д. Рис. 11

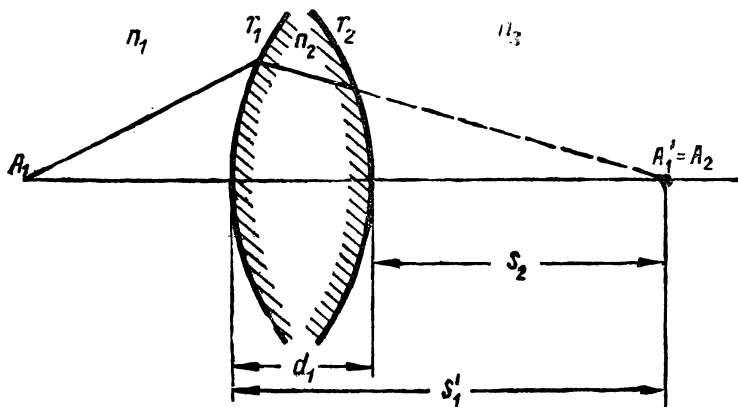


Рис. 11

поясняет переход с первой поверхности на вторую (здесь и в дальнейшем преломляющая поверхность обозначается индексом, характеризующим радиус кривизны этой поверхности). Легко видеть, что

$$s_2 = s_1' - d_1. \quad (11,7)$$

Для удобства вычисления луча через систему поверхностей вышеуказанные формулы изображают в виде схем (см. схему 3, § 52).

Высоту луча на поверхности можем найти из тр-ка MNC (рис. 10):

$$h = r \sin(u' - i'). \quad (11,8)$$

Предположим, что луч AM является нулевым.

Из уравнений (11,2) и (11,5) следует:

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

В этих выражениях заменим $\sin u$ и $\sin u'$ через u и u' ($u = \frac{h}{s}$ и $u' = \frac{h}{s'}$); q и q' из уравнений (11,1) и (11,6); $\sin i'$ из уравнения (11,3). Произведя сокращение, получим:

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

Разделив обе части равенства на r , получим:

$$n \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{r} \right) = n' \left(\frac{1}{s'} - \frac{1}{r} \right). \quad (11,9)$$

Это выражение носит название «нулевого» инварианта Аббе.

Открыв скобки, получим последнее выражение в иной форме:

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r}. \quad (11,10)$$

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

Из уравнения (11,9) можем найти фокусные расстояния одной поверхности. Предположим, что луч идет на поверхность из бесконечности, тогда $s = -\infty$, а $s' = f'$. Подставляя в формулу (11,9), получим:

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

или заднее фокусное расстояние

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

Если же $s' = \infty$, то $s = f$ и из уравнения (11,9) переднее фокусное расстояние

$$f = -\frac{nr}{n' - n}. \quad (11,12)$$

Разделив (11,11) на (11,12), получим зависимость между фо-

кусными расстояниями и показателями преломления:

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

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.

Вернемся к рис. 10 и установим зависимость между углами u и u' для нулевого луча. Эти углы в параксиальной области обозначим через α .

Закон преломления напишем в виде:

$$ni = n'i' \quad (11,14)$$

Вместо i и i' подставим в это выражение их значения через α , α' и φ , так как $i = \alpha - \varphi$, а $i' = \alpha' - \varphi$; тогда

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

Заменим $\varphi = \frac{h}{r}$ и откроем скобки

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

и после преобразования окончательно получим:

$$\alpha' = \frac{n}{n'}\alpha + \frac{h(n' - n)}{rn'}. \quad (11,15)$$

Это выражение называется *уравнением углов нулевого луча*.

Переходя к индексам поверхностей, уравнение (11,15) перепишем в виде:

$$\alpha_{k+1} = \frac{n_k}{n_{k+1}}\alpha_k + \frac{h_k(n_{k+1} - n_k)}{r_k n_{k+1}}. \quad (11,16)$$

Если в уравнении (11,16) положить:

$$\alpha_k n_k = \gamma_k, \quad (11,17)$$

то оно примет вид:

$$\gamma_{k+1} = \gamma_k + h_k \frac{n_{k+1} - n_k}{r_k} \quad (11,18)$$

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

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

Луч (рис. 12) падает на поверхность с радиусом кривизны

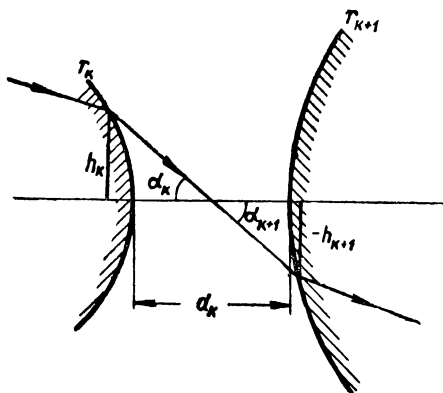


Рис. 12. К выводу формулы высот

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.

Итак,

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

Преобразуя, получим:

$$h_{k+1} = h_k - \alpha_{k+1} d_k. \quad (11,19)$$

Схема вычисления нулевого луча приведена в § 52 (схема 2).

Пример 4. 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. Последовательно применим формулу (11,10) с помощью (11,7).

Из формулы (11,10) следует:

$$s' = \frac{n'rs}{s(n' - n) + rn} \quad \text{или} \quad s'_1 = \frac{n_2 r_1 s_1}{s_1(n_2 - n_1) + r_1 n_1}$$

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 будет являться 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 5. Фотографическая камера с объективом, имеющим заднее фокусное расстояние 50 мм, погружена в воду так, что его первая поверхность соприкасается с водой. Определить фокусные расстояния объектива.

Решение. По условию примера имеем $f' = 50$ мм. Применим формулу (11,13), имея в виду, что показатель преломления воды $n = 1,33$. Следовательно, $n = 1,33$, $n' = 1$, $f' = 50$ мм,

$$f = -\frac{nf'}{n'} = -66,5 \text{ мм.}$$

Пример 6. Вычислить углы нулевого луча с оптической осью для случая приведенного в примере 4.

Решение. Дано:

$$\begin{array}{l} r_1 = 40 \\ r_2 = -40 \end{array} \quad d_1 = 5 \quad \begin{array}{l} n_1 = 1 \\ n_2 = 1,5163; \\ n_3 = 1. \end{array} \quad s_1 = -80$$

Применим формулы (11,18), (11,19) и (11,17):

$$\gamma_1 = \alpha_1 n_1, \quad \text{где} \quad \alpha_1 = \frac{h_1}{s_1}.$$

Положим, для удобства вычислений $h_1 = r_1$.

$$\gamma_1 = \frac{n_1 h_1}{s_1} = -0,5,$$

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

В формуле (11, 19) заменим α через γ :

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

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

и, наконец:

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

Известное γ_3 позволяет получить положение изображения. Так как

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

т. е.

$$s'_2 = 75,1 \text{ мм.}^3$$

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

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

§ 12. Уравнение Гюйгенса — Гельмгольца

Пучок нулевых лучей, вышедший из точки A плоскости предмета P (рис. 13) после преломления поверхностью с радиусом кривизны r , образует изображение в точке A' , плоскости изображения P'

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 занима-

ла положения P_1P_1' и P_2P_2' . Поверхность предметов представлена дугой P_1AP_2 , а поверхность изображения дугой $P_1'A'P_2'$.

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.

Таким образом, плоская поверхность предметов P не может изображаться плоской поверхностью изображения P' , а

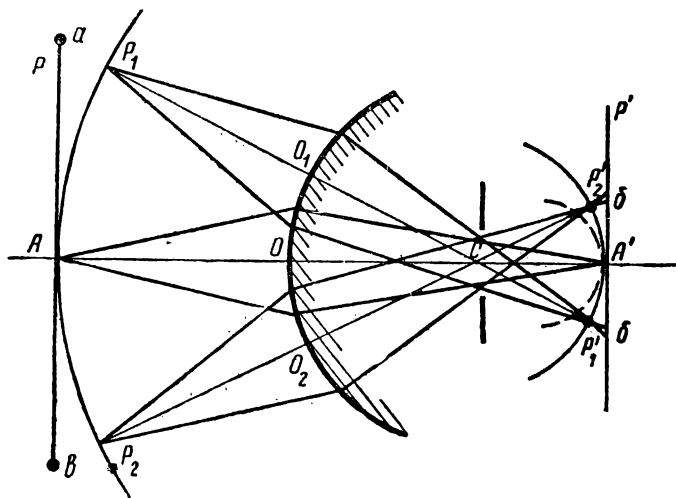


Рис. 13. Образование изображения одной сферической поверхностью

изображения точек a и b будут представлены в плоскости P' в виде кружков рассеяния δ .

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 образовать 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. 14) выходит луч под углом α и после преломления на поверхности с радиусом кривизны r пересекает оптическую ось в точке A' . Точки A и A' есть точки сопряжен-

ные. Тогда плоскость предметов, содержащая l , должна быть оптически сопряжена с плоскостью изображений, содержащей l' .

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

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

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

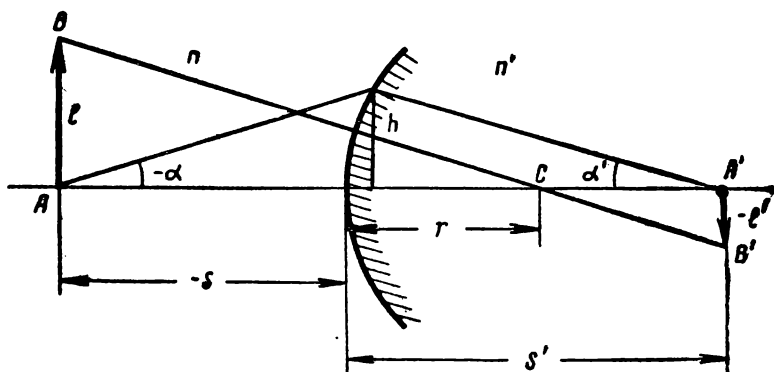


Рис. 14. Изображение точки вне оптической оси

Уравнение (11,9) можем представить в ином виде, приводя 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,

$$\frac{l'}{l} = \frac{ns'}{n's}, \quad (12,1)$$

где

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

Подставляя s и s' в последнее выражение и сокращая на h , получим:

$$n'l'a' = nla. \quad (12,2)$$

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:

$$n_1 l_1 \alpha_1 = n_2 l_2 \alpha_2 = \dots = n_{k+1} l_{k+1} \alpha_{k+1} \quad (12,3)$$

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 7. 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 4 и 6). Величина светового тела источника света 6 мм.

Решение. Воспользуемся данными, полученными в примере 6, т. е.

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

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

$$l_3 = -5,64 \text{ мм.}$$

§ 13. Линейное увеличение

Линейным увеличением называется отношение величины изображения к величине предмета:

$$\beta = \frac{l'}{l}. \quad (13,1)$$

В сложной оптической системе линейным увеличением бу-

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

дет называться отношение величины изображения после последней сферической поверхности к самому предмету, т. е.

$$\beta = \frac{l'_k}{l_1} \quad (13, 2)$$

Для первой поверхности, пользуясь уравнением (12,1), напишем:

$$\frac{l'_1}{l_1} = \frac{n_1 s'_1}{n_1 s_1},$$

а для второй:

$$\frac{l'_2}{l_2} = \frac{n_2 s'_2}{n_2 s_2}$$

Для k -той поверхности это выражение примет вид:

$$\frac{l'_k}{l_k} = \frac{n_k s'_k}{n_k s_k}.$$

Эти выражения перемножим почленно, имея в виду, что $n_1' = n_2$ и т. д.:

$$\frac{l'_k}{l_k} = \frac{n_1 s'_1}{n_2 s_1} \cdot \frac{n_2 s'_2}{n_3 s_2} \cdot \dots \cdot \frac{n_k s'_k}{n_{k+1} s_k}$$

После сокращения получим окончательно формулу линейного увеличения для сложной оптической системы:

$$\beta = \frac{n_1}{n_{k+1}} \frac{s'_1 s'_2 s'_3 \dots s'_k}{s_1 s_2 s_3 \dots s_k} \quad (13,3)$$

Величины s и s' вычисляются по формуле (11,10). Линейное увеличение иногда называют поперечным увеличением. Оптические системы, имеющие одинаковое значение линейного увеличения во всех точках изображения, называются *системами круговой симметрии*.

Пример 8. Определить линейное увеличение конденсорной линзы с конструктивными элементами: $r_1 = 40$; $r_2 = -40$; $d = 5$; $n = 1,5163$, с помощью которой освещается щель спектрального прибора. Источник света расположен на расстоянии 80 мм перед линзой.

Решение. Для решения задачи воспользуемся данными, полученными в примере 4, т. е.

$$s_1 = -80 \quad s'_1 = 3720,98$$

$$s_2 = 3715,98 \quad s'_2 = 75,1.$$

Применение формулы (13,3) дает при $n_1 = n_2 = 1$

$$\beta = \frac{n_1 s'_1 s'_2}{n_2 s_1 s_2} = -0,94.$$

§ 14. 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. 14):

$$\gamma = \frac{\text{tg } \alpha'}{\text{tg } \alpha} \quad (14,1)$$

Уравнение (12,2) представим в виде:

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

Отношение l' к l есть линейное увеличение β . При малости углов α и α' можем написать:

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

или

$$\gamma = \frac{n_1}{n_{k+1}} \frac{1}{\beta} \quad (14,2)$$

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

§ 15. Преломление луча плоской поверхностью

Оптические детали с плоскими преломляющими поверхностями имеют значительное распространение в оптических приборах. К их числу относятся отражающие 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 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. 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.

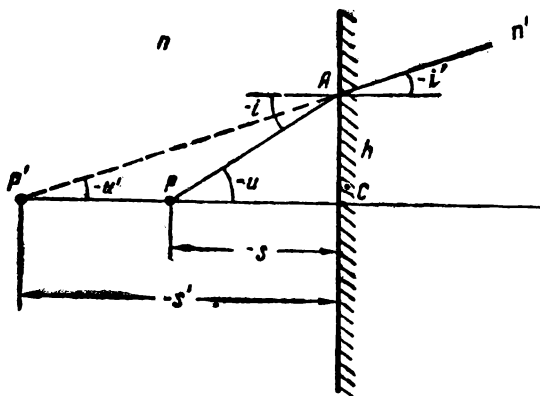


Рис. 15. Плоская преломляющая поверхность

Плоская поверхность с радиусом кривизны $r = \infty$ (рис. 15) разделяет две оптические среды с показателями преломления n и n' .

Предмет расположен в точке P . Изображение мнимое в точке P'

Угол луча с осью u равен углу падения i , а угол u' после преломления равен углу преломления i' , определяемому из (5,1).

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

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

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

§ 16. Преломление луча через плоскопараллельную пластину

Плоскопараллельной пластиной называется оптическая деталь круглой или прямоугольной формы, ограниченная с двух сторон полированными плоскими поверхностями, параллельными друг другу. Любая из нормалей к поверхности может быть оптической осью, однако обычно таковой бывает ось симметрии детали.

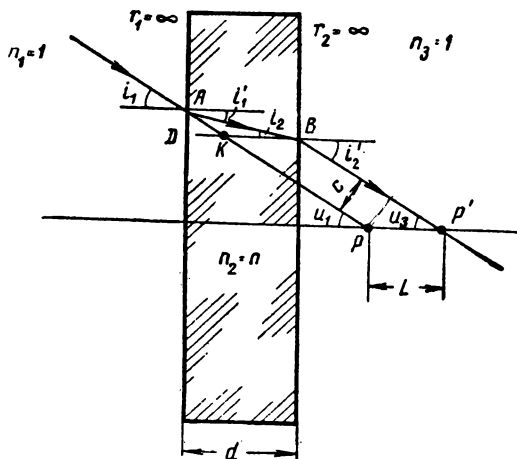


Рис. 16. Преломление луча через плоскопараллельную пластинку

Пучок лучей, ограниченный лучом AP (рис. 16) 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. 16 $L = DB - DK = d - AD \operatorname{ctg} i_1$. Но $AD = d \operatorname{tg} i'_1$, тогда:

$$L = d \left(1 - \frac{\operatorname{tg} i'_1}{\operatorname{tg} i_1} \right). \quad (16,1)$$

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,

$$L_0 = \frac{n-1}{n} d. \quad (16,2)$$

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

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

Из рис. 16 следует, что $c = AB \sin (i_1 - i'_1)$,

но
$$AB = \frac{d}{\cos i'_1},$$

тогда:

$$c = \frac{d \sin (i_1 - i'_1)}{\cos i'_1}. \quad (16,3)$$

Формула (16,3) устанавливает связь между поперечным смещением c 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 имеет практического значения.

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 9. В зрительной трубе расстояние между объективом и окуляром составляло 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 (16,2):

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

Новое расстояние между объективом и окуляром будет равно сумме старого плюс величина смещения L_0 , т. е. 186,7 мм.

Пример 10. 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 на 30° . Определить величину поперечного смещения луча.

Решение. Применим формулу (16,3), зная что $i_1 = 30^\circ$. Для нахождения i_1' воспользуемся формулой (5,1):

$$\sin i_1' = \frac{\sin i_1}{n} = 0,318714,$$

$$i_1' = 18^\circ 35' 07''$$

и

$$c = 1,25 \text{ мм.}$$

§ 17. Астигматизм пластины

Рассмотрим преломление элементарных пучков лучей, идущих в двух плоскостях, перпендикулярных друг другу.

Представим себе плоскость, содержащую оптическую ось и вращающуюся вокруг этой оси. Очевидно, таких плоскостей может быть бесконечное количество и плоскость чертежа есть частный случай такой плоскости, называемой *меридиональной* (рис. 17).

Плоскость же, которая содержит луч и является перпендикулярной меридиональной, называется *сагиттальной*. Если меридиональная плоскость в сложной оптической системе сохраняет свое неизменное положение (плоскость чертежа), то сагиттальная, оставаясь перпендикулярной меридиональной, получает излом при преломлении от одной поверхности к другой.

В этих двух плоскостях лучи преломляются по-разному, образуя различные точки схода бесконечно узких пучков лучей. Расстояние между этими точками схода называется *ас-*

тигматической разностью, а само явление образования двух изображений вместо одного — астигматизмом.

Рассмотрим преломление луча в меридиональной плоскости. Из точки P_1 (рис. 17) на плоскую поверхность раздела двух сред падает узкий пучок лучей с углом расходимости лучей di . Лучи образуют точки пересечения с плоскостью M_1 и M_2 . Из тр-ка $P_1M_2M_1$ можем написать, имея в виду, что $M_1P_1 = \rho$:

$$\frac{dh}{di} = \frac{\rho}{\cos i}.$$

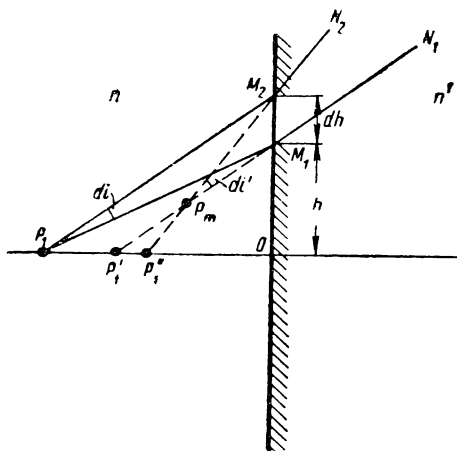


Рис. 17. Преломление луча в меридиональной плоскости

Отсюда:

$$di = \frac{dh \cos i}{\rho}$$

После преломления получаем пучок лучей $N_1P_mN_2$. Этот пучок сходится в точке P_m , которая является мнимым изображением.

Из тр-ка $M_1M_2P_m$ аналогично можем написать, имея в виду, что $M_1P_m = \rho_m$:

$$di' = \frac{dh \cos i'}{\rho_m}.$$

Найдем отсюда отношение:

$$\frac{di'}{di} = \frac{\rho \cos i'}{\rho_m \cos i}. \quad (17,1)$$

Далее продифференцируем закон преломления

$$n \cos i \, di = n' \cos i' \, di'$$

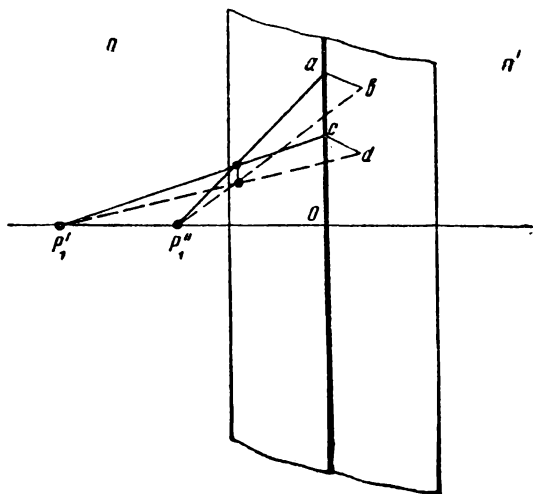


Рис. 18. Преломление луча в сагиттальной плоскости

и найдем отсюда отношение:

$$\frac{di'}{di} = \frac{n \cos i}{n' \cos i'}. \quad (17,2)$$

Сравнивая (17,1) и (17,2), находим:

$$\frac{\rho \cos i'}{\rho_m \cos i} = \frac{n \cos i}{n' \cos i'}$$

и окончательно:

$$\rho_m = \frac{\rho n' \cos^2 i'}{n \cos^2 i}. \quad (17,3)$$

Теперь рассмотрим преломление луча в сагиттальной плоскости.

Часть рис. 17 представлена на рис. 18, где показаны пучки лучей $P_1' cd$ и $P_1'' ab$ в сагиттальной плоскости.

Из тр-ка P_1M_1O (рис. 17) следует:

$$h = \rho \sin i,$$

а из тр-ка $P_1'Oc$ (рис. 18) получим, имея в виду, что $P_1'c = \rho_s$:

$$h = \rho_s \sin i'$$

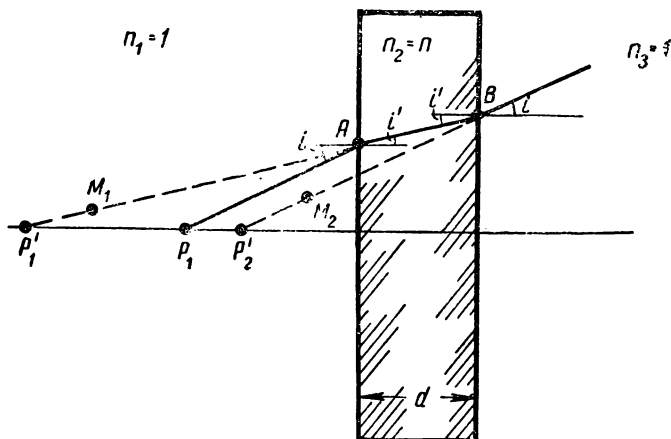


Рис. 19

Находим отсюда отношение синусов, зная, кроме того, отношение синусов из закона преломления.

Тогда получим:

$$\rho_s = \frac{n'}{n} \rho. \quad (17,4)$$

Вычитая из (17,4) (17,3), получим астигматическую разность:

$$\rho_s - \rho_m = \frac{n'}{n} \rho \left(1 - \frac{\cos^2 i'}{\cos^2 i} \right). \quad (17,5)$$

Астигматизм плоскопараллельной пластины можем найти, последовательно определяя положение фокусов меридиональных и сагиттальных лучей на каждой поверхности.

Фокус меридиональных лучей после преломления на первой поверхности расположен, допустим, в точке M_1 (рис. 19).

Известно, что $AM_1 = \rho'_{1,m}$ и $n_1 = 1$. По формуле (17,3):

$$\rho'_{1,m} = \rho_1 n \frac{\cos^2 i'}{\cos^2 i}$$

Найдем расстояние $BM_1 = p_2$. Точка M_1 является объектом для второй поверхности.

$$BM_1 = p_1 n \frac{\cos^2 i'}{\cos^2 i} + \frac{d}{\cos i'}$$

Допустим, что после преломления на второй поверхности фокус меридиональных лучей расположен в точке M_2 , т. е.

$$BM_2 = p'_{2,m}$$

Тогда по той же формуле (17,3) получим:

$$p'_{2,m} = \left(p_1 n \frac{\cos^2 i'}{\cos^2 i} + \frac{d}{\cos i'} \right) \frac{\cos^2 i}{n \cos^2 i'}$$

или, после сокращения:

$$p'_{2,m} = p_1 + \frac{d \cos^2 i}{n \cos^3 i'} \quad (17,6)$$

Аналогичным образом рассмотрим лучи, идущие в сагиттальной плоскости.

Точка P'_1 есть фокус сагиттальных лучей после преломления на первой поверхности, а точка P'_2 — после преломления на второй.

Применяя формулу (17,4) для первой поверхности, получим:

$$p'_{1,s} = p_1 n$$

Для второй поверхности величиной p_2 будет сумма $P'_1 A + AB$, т. е.

$$p_2 = p_1 n + \frac{d}{\cos i'}$$

или по формуле (17,4)

$$p'_{2,s} = \frac{1}{n} \left(p_1 n + \frac{d}{\cos i'} \right),$$

или

$$p'_{2,s} = p_1 + \frac{d}{n \cos i'} \quad (17,7)$$

Для определения астигматической разности вычтем (17,6) из (17,7):

$$p'_{2,s} - p'_{2,m} = p_1 + \frac{d}{n \cos i'} - p_1 - \frac{d \cos^2 i}{n \cos^3 i'}$$

или

$$p'_{2,s} - p'_{2,m} = \frac{d}{n \cos i'} \left(1 - \frac{\cos^2 i}{\cos^2 i'} \right). \quad (17,8)$$

Пример 11. В фотографический аппарат, применяемый для репродукции, в ход лучей между объективом и плоскостью изображения введена плоскопараллельная пластина толщиной 50 мм из стекла с показателем преломления $n = 1,5163$. Такой пластиной может явиться прямоугольная отражающая призма, эквивалентная действию плоскопараллельной пластины, применяемая для поворота пучков лучей на 90° . Пучки лучей направляются в призму под углом 20° . Определить астигматическую разность, вводимую подобной призмой.

Решение. Используем формулу (17,8), для которой углы преломления i' найдем по формуле (5,1):

$$\sin i' = \frac{\sin i}{n'} = 0,22556,$$

$$i' = 13^\circ 02' 10''; \quad \cos i = 0,93970;$$

$$\cos i' = 0,97423,$$

$$p'_s - p'_m = 2,36 \text{ мм.}$$

§ 18. Преломление луча через клин

Клином 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° .

Из рис. 20 легко установить зависимость между преломляющим углом σ и углом отклонения ω .

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

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

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. 20), то после преломления его размер m' . Отношение этих отрезков есть коэффициент аноморфозы или коэффициент трансформирования (более подробно см. § 32):

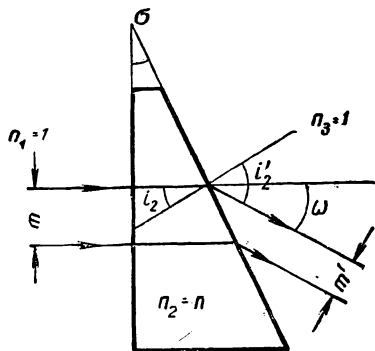


Рис. 20. Клин

$$K_a = \frac{m'}{m}. \quad (18,4)$$

Пример 12. Определить угол отклонения и угловую дисперсию клина с преломляющим углом 6° из оптического стекла сорта 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):

$$\omega = 0,05421.$$

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 в достижении 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 и поверхности, удовлетворяющие уравнениям высшего порядка.

При определении положения изображения в паракиальной области несферические поверхности заменяют сферическими, а 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 $y = f(x)$, выраженным в прямоугольных координатах с цент-

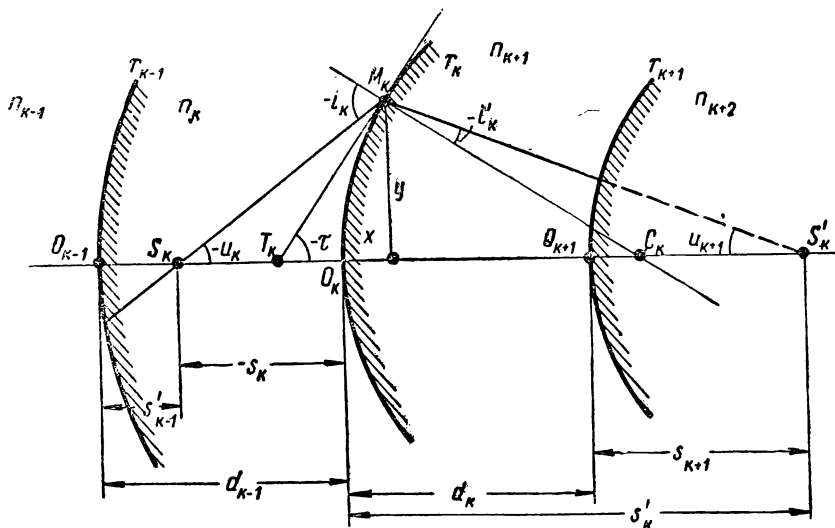


Рис. 21. Несферическая поверхность

ром 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. 21).

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} будет иметь параметры u_k и s'_{k-1} .

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

Координаты точки M_k находятся из решения двух уравнений с двумя неизвестными x и y :

$$\begin{aligned} y &= f(x), \\ y &= (s_k - x) \operatorname{tg} u_k. \end{aligned} \quad (19,1)$$

Угол наклона касательной в точке M_k с координатами x и y к оптической оси определяется через первую производную

$$y' = \operatorname{tg} \tau. \quad (19,2)$$

Из треугольника $S_k M_k T_k$ находим:

$$i_k = u_k - 90^\circ - \tau_k. \quad (19,3)$$

Угол преломления находим из оптического инварианта:

$$\sin i'_k = \frac{n_k \sin i_k}{n_{k+1}}. \quad (19,4)$$

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

$$u_{k+1} = 90^\circ + \tau + i'_k \quad (19,5)$$

и, наконец,

$$s'_k = x + \frac{y}{\operatorname{tg} u_{k+1}}. \quad (19,6)$$

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.

Следует иметь в виду, что совместное решение уравнений (19,1) в ряде случаев приводит к потере точности.

Основным в этой проблеме является отыскание точки встречи луча с несферической поверхностью. Существуют различные приемы для вычисления лучей через несферические поверхности. Эти приемы в некоторых случаях дают положительные результаты, однако универсального простого способа еще не найдено.

Одним из таких способов может быть выделение задачи об отыскании точки встречи луча с поверхностью в самостоятельную вычислительную операцию (например, решение уравнений (19,1) методом итерации).

Применение несферических поверхностей сдерживается недостаточным развитием средств контроля качества их изготовления. Этим поверхностям принадлежит будущее в оптике.

Глава четвертая

ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

§ 20. 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 приемами вычислительной оптики достигать образования реальных оптических систем, которые всеми своими оптическими свойствами соответствовали бы 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 корригирования системы на аберрации. Предварительное определение габаритов системы (диаметров и длин) в преобладающем числе случаев не требует аберрационного расчета. Определить фокусные расстояния компонентов системы, их расстояние 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 аберраций, дающая изображение конечной величины при помощи широких пучков, называется *идеальной оптической системой*. Основанием теории идеальной оптической системы являются положения:

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 изображений соответствующая ей точка также лежит на прямой, соответственной 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.

§ 21. Главные точки и фокусные расстояния

Представим себе оптическую систему, состоящую из ряда сферических поверхностей, в которой поверхности O и O' (рис. 22) 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, то такую точку F' условились называть *задним (вторым) фокусом*. Если же лучи идут из пространства изображений, то в пространстве предметов так же, как и ранее, они образуют одну точку схода F , 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 системы. На рис. 22 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

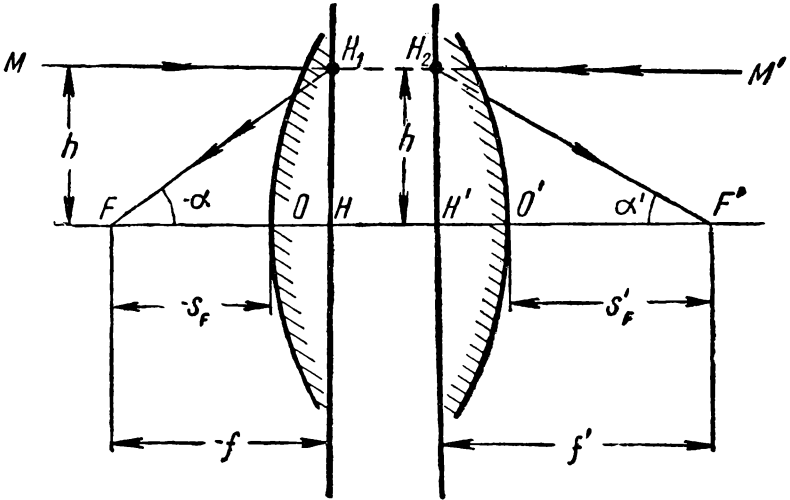


Рис. 22. Главные точки и фокусные расстояния

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 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 собой следы оптической оси на главных плоскостях, называются *первой и второй главными точками* си-

стемы. 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 высоты 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. Главные фокусные расстояния 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. 22 следует:

$$f' = \frac{h}{\operatorname{tg} \alpha'}, \quad (21,1)$$

$$f = \frac{h}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (21,2)$$

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

В практике многих отраслей промышленности вместо наименования главных точек и плоскостей применяют термин узловых точек и плоскостей* Строго говоря, это справедливо для оптической системы, расположенной в однородной среде, что и имеет место в преобладающем большинстве случаев.

Если толщины линз и воздушных промежутков принять равными нулю, то такая оптическая система будет называться *тонкой*. Для тонкой системы показывают не две главные плоскости, а одну, в которой как бы сливаются вместе передняя и задняя.

§ 22. Зависимости между положениями предметов и их изображений

Оптическая система (рис. 23) представлена в виде системы главных плоскостей H и H' . Предмет l , расположенный в точке A , находится от точки переднего фокуса на расстоянии x . Изображение l' графически определится пересечением в пространстве изображения двух лучей, один из которых выходит из точки B и идет 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' .

Из подобия треугольников BAF и FHN следует:

$$\frac{l'}{l} = -\frac{f}{x}. \quad (22,1)$$

Аналогично из подобия треугольников $N'H'F'$ и $F'A'B'$:

$$\frac{l'}{l} = -\frac{x'}{f'}. \quad (22,2)$$

Отсюда получаем выражение, называемое *формулой Ньютона*:

$$xx' = ff'. \quad (22,3)$$

* Узловыми точками называются такие, угловое увеличение в которых равно плюс единице. Линейное увеличение в узловых плоскостях равно $\frac{n}{n'}$.

Если оптическая система находится в однородной среде, то $-f=f'$ и вместо уравнения (22,3) имеем:

$$xx' = -(f')^2. \quad (22,4)$$

Из выражений (22,1) и (22,2) получаем формулы линейного увеличения идеальной оптической системы:

$$\beta = -\frac{f}{x}, \quad (22,5)$$

$$\beta = -\frac{x'}{f'} \quad (22,6)$$

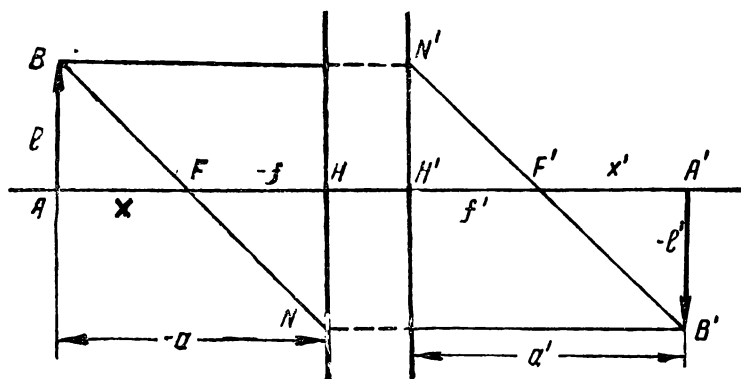


Рис. 23. К выводу формулы Ньютона

Согласно рис. 23, имеем: $x = a - f$ и $x' = a' - f'$.

Подставляя в формулу (22,3) и раскрывая скобки, получим:

$$\frac{f'}{a'} + \frac{f}{a} = 1. \quad (22,7)$$

Если система находится в однородной среде, то формула (22,7) приобретает вид, известный под названием *формулы отрезков*:

$$-\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f'}. \quad (22,8)$$

Из рис. 23 следует, что отношение l' к l равно отношению a' к a , т. е.

$$\beta = \frac{a'}{a}. \quad (22,9)$$

Подставив (22,9) в (22,8), получим:

$$a = \frac{(1 - \beta)f'}{\beta}, \quad (22,10)$$

$$a' = (1 - \beta)f'. \quad (22,11)$$

Формулы (22,8 — 22,11) справедливы при $-f=f'$.

Пример 13. 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 (22,8) и учтем (22,9):

$$a = \frac{-a + a'}{\beta - 1} = -500 \text{ мм}$$

и, следовательно, $a' = 2500$ мм.

Затем из формулы (22,11) окончательно получим:

$$f' = \frac{a'}{1 - \beta} = 417 \text{ мм.}$$

На практике f' объектива подбирают ближайшим к вычисленному.

§ 23. Продольное увеличение

Оптическая система (рис. 24) 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 Δx 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 Δx . Предел отношения $\Delta x'$ к Δx , когда Δx 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

$$\alpha = \frac{dx'}{dx} = -\frac{x'}{x}. \quad (23,1)$$

Из (22,5) и (22,6) выделим x и x' и подставим их в формулу (23,1):

$$\alpha = -\frac{f'}{f} \beta^2. \quad (23,2)$$

Заменим отношение фокусных расстояний по формуле (11,13):

$$\alpha = \frac{n'}{n} \beta^2. \quad (23,3)$$

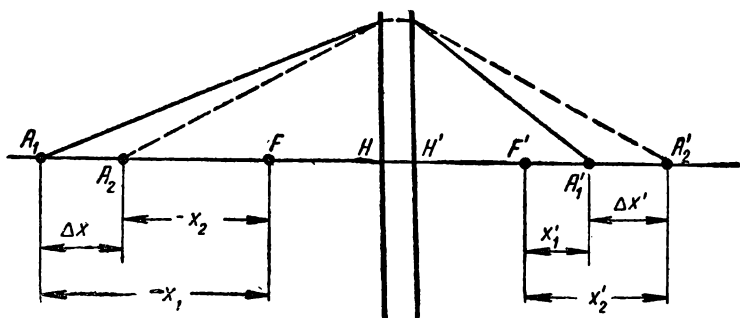


Рис. 24. К выводу формулы продольного увеличения

Отсюда следует, что продольное увеличение пропорционально квадрату линейного.

Ранее была получена формула (14,2), устанавливающая связь между линейным и угловым увеличениями.

Найдем из этой формулы отношение показателей преломления и подставим в формулу (23,3). Тогда окончательно получим связь между продольным, линейным и угловым увеличениями:

$$\alpha \gamma = \beta. \quad (23,4)$$

Пример 14. 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.

Применим формулы продольного увеличения и (23,3), при $n=n'$ получим:

$$dx' = \beta^2 dx = 9 \text{ мм.}$$

§ 24. Формула фокусного расстояния

Луч MM' (рис. 25), идущий параллельно оптической оси, после преломления в линзе пересечет оптическую ось в точке F' , образуя точку заднего фокуса. В точке F' перпендикулярно оптической оси проходит задняя фокальная плоскость, сопряженная с плоскостью предметов в бесконечности. Луч BH

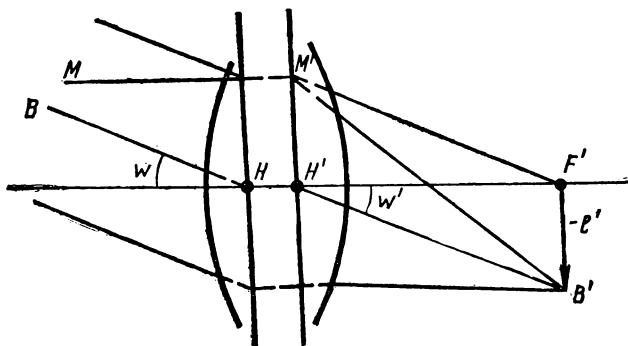


Рис. 25

из точки предметов направляется в переднюю главную точку H под углом ω . Так как линейное увеличение в главных точках равно $+1$, то луч выйдет из задней главной точки H' под углом ω' , равным ω . Здесь предполагаем, что оптическая система расположена в однородной среде, в воздухе, т. е. $n=n'=1$.

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

Из рис. 25 легко получаем:

$$f' = -\frac{l'}{\operatorname{tg} \omega'}, \tag{24,1}$$

а так как $-f=f'$, то:

$$f = \frac{l'}{\operatorname{tg} \omega'} \tag{24,2}$$

или, так как $\omega = \omega'$, то

$$f = \frac{l'}{\operatorname{tg} \omega}. \quad (24,3)$$

Для собирающей системы, например для обычного объектива, при определении знака f' по формуле (24,1) учитываются разные знаки у l' и ω' , что дает положительное значение f' .

Эти формулы используются при измерении фокусного расстояния объективов. Приборы, которые служат для этой цели, называются фокометрами.

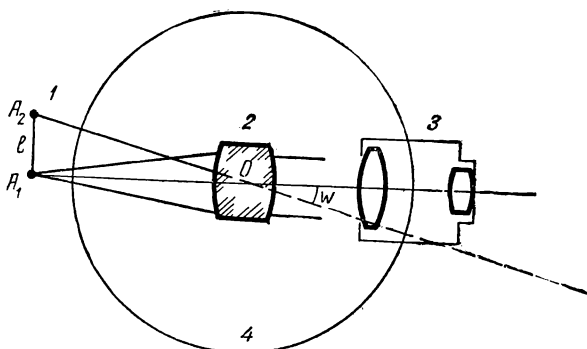


Рис. 26. Фокометр:
1 — шкала; 2 — испытуемый объектив; 3 — зрительная труба; 4 — лимб гониометра

Схему одного из фокометров приводим на рис. 26. Зрительная труба 3 вращается вокруг оси вращения лимба 4. Шкала с делениями 1 устанавливается в фокальной плоскости испытуемого объектива 2. Испытуемый объектив устанавливается так, чтобы его главная плоскость совпадала с центром вращения лимба O (на рис. 26 — задняя). Для этого объектив устанавливают на центр лимба и перемещают вдоль оптической оси до тех пор, пока при наблюдении в зрительную трубу и повороте лимба с объективом изображение шкалы не будет неподвижным, что означает равенство углов $\omega = \omega'$. В этом случае линейное увеличение равно угловому ($\beta = +1$).

Зрительная труба поочередно устанавливается на видимость точек на шкале A_1 и A_2 , а по лимбу гониометра измеряется угол ω , соответствующий этому повороту. Затем фокусное расстояние вычисляется по формуле (24,1).

§ 25. Тонкая линза и система тонких линз

Если в реальной толстой линзе толщина мала в сравнении 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. 27), расположенными друг от друга на расстояниях d_1 и d_2 .

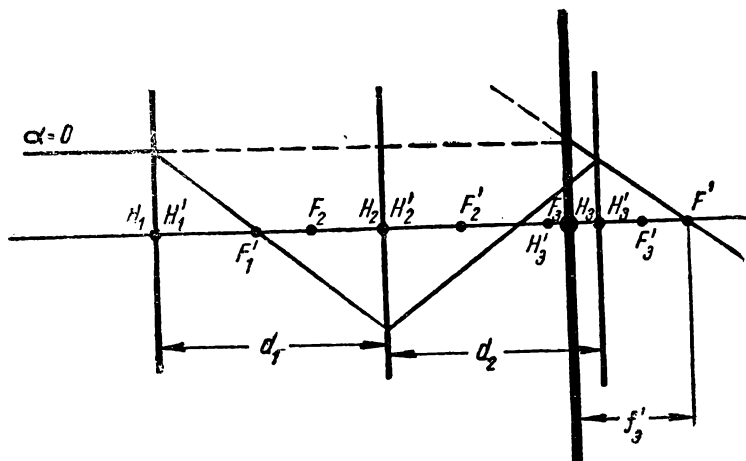


Рис. 27. Система тонких линз

Направим в систему луч под углом $\alpha = 0$. По известному правилу графического определения положения главных плоскостей найдем положение эквивалентной задней главной плоскости H'_3 . Расстояние $H'_3 F' = j'_3$ будет 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 классифицируем по признакам положения предмета и изображения.

1. Предмет расположен в бесконечности ($-\infty$), а изоб-

ражение находится на конечном расстоянии. Примером такой системы является фотографический объектив (рис. 28, 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 конеч-

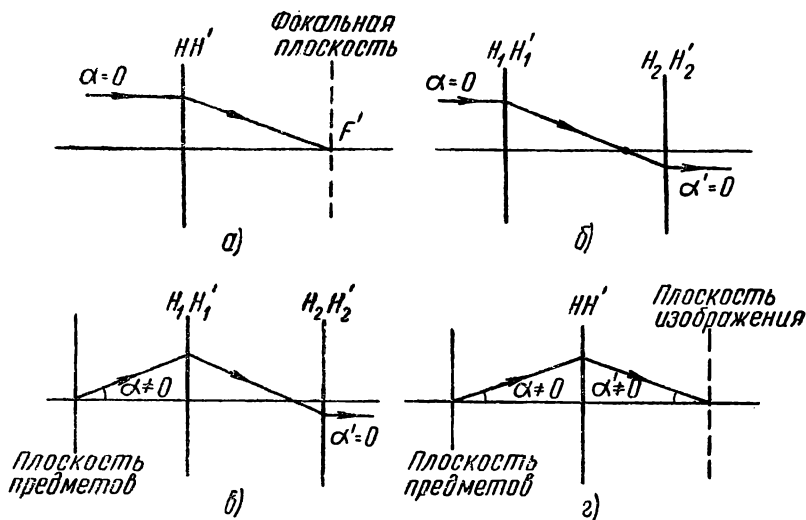


Рис. 28. Типы оптических систем:

а — фотографический объектив; б — телескопическая система; в — система микроскопа; г — проекционная и репродукционная системы

ном расстоянии от системы. Это изображение или фотографируется с помощью светочувствительного материала, или непосредственно рассматривается на матовой поверхности наблюдателя.

Примером последних систем являются визиры кино съемочных камер и аэровизеры, в которых изображение рассматривается на матовой поверхности без окуляра. Такие системы мы будем называть *фотографическими*.

2. Предмет расположен в бесконечности ($-\infty$). Изображение находится также в бесконечности ($+\infty$). Примером такой системы является зрительная труба (рис. 28, б). 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, панорамы, дальномеры, перископы, нивелиры, теодолиты, кипрегели 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. 28,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 фототриграмметрические 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 является проекционный объектив и фоторепродукционный объектив (рис. 28,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 кинопроекторных 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.

Примеры положения предмета и изображения для положительной и отрицательной тонких линз показаны на рис. 29, 30.

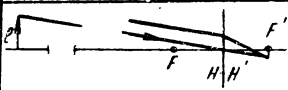
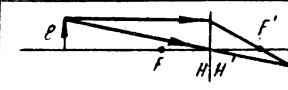
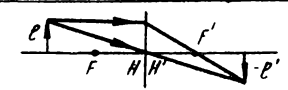
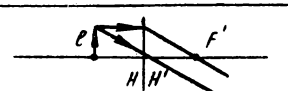

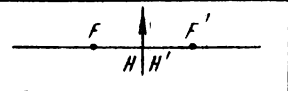

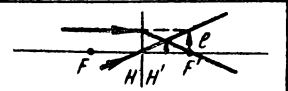

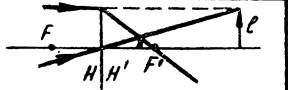
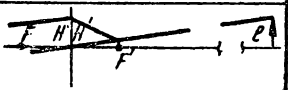
Положительная линза					
N n/n	Положение предмета a	Оптическая схема	Положение изображен a'	Характеристика изображения	
				прямое или обратное	действ или мнимое
1	$-\infty$		f'	обратн.	действ.
2	$< 2f$		$> f'$	обратн.	действ.
3	$2f$		$2f'$	обратн.	действ.
4	f		∞	обратн.	действ.
5	$< -f$		$-a' > a$	прямое	мнимое
6	0		0	прямое	действ.
7	$< f'$		$< a$	прямое	действ.
8	f'		$\frac{f'}{2}$	прямое	действ.
9	$2f'$		$< f'$	прямое	действ.
10	$> 2f'$		$< f'$	прямое	действ.
11	$+\infty$		f'	прямое	действ.

Рис. 29

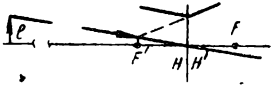
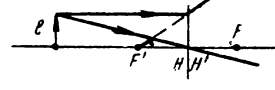
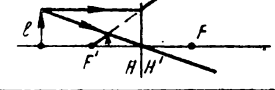
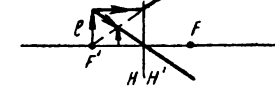
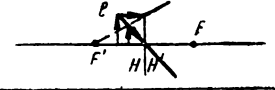
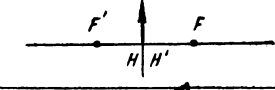
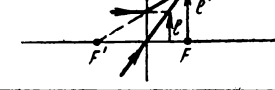
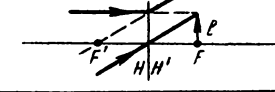
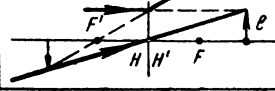
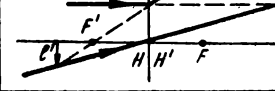
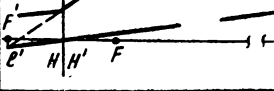
Отрицательная линза					
N п/п	Положение предмета a	Оптическая схема	Положение изображен. a'	Характеристика изображения	
				прямое или обратное	действ. или мнимое
	∞		f'	прямое	мнимое
2	$< 2f'$		$< -f'$	прямое	мнимое
3	$2f'$		$< -f'$	прямое	мнимое
4	f'		$\frac{f'}{2}$	прямое	мнимое
5	$< -f'$		$< -\frac{f'}{2}$	прямое	мнимое
6	0		0	прямое	действ.
7	$< f$		$> a$	прямое	действ.
8	f		∞	прямое	действ.
9	$2f$		$2f'$	обратн.	мнимое
10	$> 2f$		$< 2f'$	обратн.	мнимое
11	$+ \infty$		f'	обратн.	мнимое

Рис. 30.

§ 26. Оптическая сила системы

Из уравнения (11,13) следует:

$$-\frac{n}{f} = \frac{n'}{f'}$$

Эти отношения называются *оптической силой системы*. Фокусное расстояние оптической системы или его обратная величина является мерой оптического действия системы.

Оптическое действие системы проявляется двояким образом. Во-первых, чем больше оптическая сила, тем ближе к системе расположено изображение, во-вторых, чем больше оптическая сила, тем меньше величина изображения.

Большой частью оптическую систему рассматривают в воздухе, тогда $n = n' = 1$ и за оптическую силу системы линз принимают величину, обратную заднему фокусному расстоянию:

$$\Phi = \frac{1}{f'}. \quad (26,1)$$

Единицей оптической силы является *диоптрия*. Одна диоптрия есть оптическая сила системы (линзы) в воздухе с фокусным расстоянием, равным одному метру.

Выражая число фокусного расстояния в миллиметрах, будем иметь:

$$\Phi = \frac{1000}{f'}. \quad (26,2)$$

Например, линза с фокусным расстоянием 50 мм имеет оптическую силу в 20 Dpt (Dpt — диоптрия).

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.

§ 27. Формула углов

Точка A расположена на оптической оси системы с главными плоскостями NN' (рис. 31). Ее изображением является точка A' .

Установим зависимость между углами α и α' .

Из рис. 31 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 (22,7). Получим:

$$\frac{f \operatorname{tg} \alpha}{h} + \frac{f' \operatorname{tg} \alpha'}{h} = 1.$$

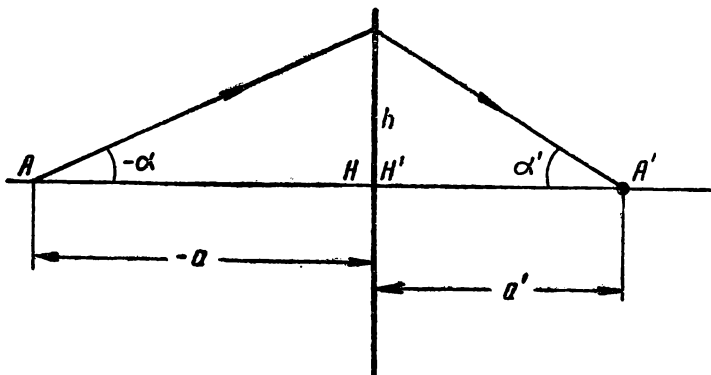


Рис. 31. К выводу формулы углов тонкой системы.

Разделив все члены последнего уравнения на f' и учитывая (26,1), получим:

$$\operatorname{tg} \alpha' = -\frac{f}{f'} \operatorname{tg} \alpha + h\Phi$$

или в общем случае

$$\operatorname{tg} \alpha_{k+1} = -\frac{f_k}{f'_k} \operatorname{tg} \alpha_k + h_k \Phi_k. \quad (27,1)$$

В этом выражении отношение фокусных расстояний заменим отношением показателей преломления через уравнение (11,13):

$$\operatorname{tg} \alpha_{k+1} = \frac{n_k}{n_{k+1}} \operatorname{tg} \alpha_k + h_k \Phi_k. \quad (27,2)$$

Если оптическая система находится в однородной среде,

например в воздухе, то $n_k = n_{k+1}$ и формула (27,2) получает общеизвестный вид:

$$\operatorname{tg} \alpha_{k+1} = \operatorname{tg} \alpha_k + h_k \Phi_k. \quad (27,3)$$

Величина h_k определяется по формуле (11,19), т. е.

$$h_{k+1} = h_k - \operatorname{tg} \alpha_{k+1} d_k. \quad (27,4)$$

§ 28. Оптическая сила двух систем

Две системы с оптическими силами Φ_1 и Φ_2 расположены на одной оптической оси OO' на расстоянии d друг от друга (рис. 32).

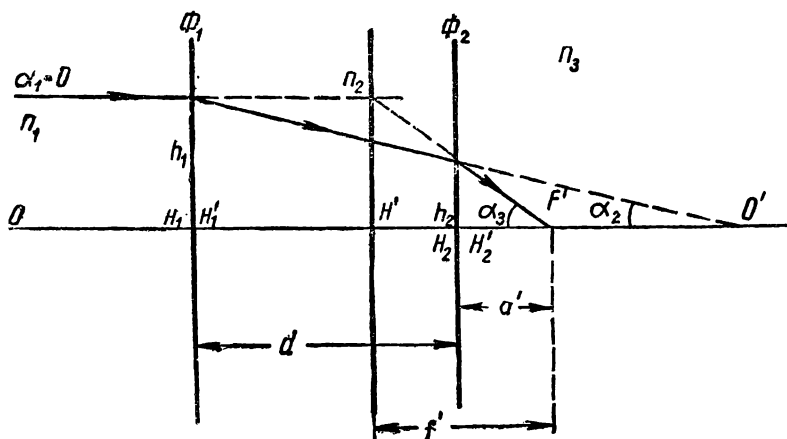


Рис. 32. К выводу оптической силы двух систем

Общее фокусное расстояние обеих систем f' называется *эквивалентным фокусным расстоянием*.

В соответствии с формулой (21,1) имеем:

$$\Phi = \frac{1}{f'} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_3}{h_1}. \quad (28,1)$$

Так как $\alpha_1 = 0$, то, применяя формулу углов (27,2) и формулу высот (27,4), будем иметь:

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = h_1 \Phi_1$$

и

$$h_2 = h_1 - \operatorname{tg} \alpha_2 d = h_1 (1 - \Phi_1 d) \quad (28,2)$$

и далее, с учетом $n_3 = 1$,

$$\operatorname{tg} \alpha_3 = \frac{n_2}{n_3} \operatorname{tg} \alpha_2 + h_2 \Phi_2 = n_2 h_1 \Phi_1 + h_1 (1 - \Phi_1 d) \Phi_2. \quad (28,3)$$

Подставив последнее выражение в уравнение (28,1), получим основное уравнение:

$$\Phi = n_2 \Phi_1 + \Phi_2 - d \Phi_1 \Phi_2. \quad (28,4)$$

Если каждая оптическая система находится в однородной среде, то

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - d \Phi_1 \Phi_2. \quad (28,5)$$

Расстояние от системы до точки заднего главного фокуса найдем по формуле:

$$a' = \frac{h_2}{\operatorname{tg} \alpha_3}.$$

Подставив (28,2) и (28,3), получим:

$$a' = \frac{1 - \Phi_1 d}{\Phi}. \quad (28,6)$$

Пример 15. 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 (26,1) получим:

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \frac{1}{f_1'} = 0,025 \quad \text{и} \quad \Phi = \frac{1}{f'} = 0,04.$$

Из (28,5) следует:

$$d = \frac{\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi}{\Phi_1 \Phi_2} = 16 \text{ мм.}$$

§ 29. Толстая линза

Линза с радиусами кривизны поверхностей r_1 и r_2 (рис. 33), 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, положения главных плоскостей в линзе и оптическую силу линзы.

Формулу (11,11) представим в виде:

$$\Phi_k = \frac{n_{k+1} - n_k}{n_{k+1} r_k}$$

и найдем Φ_1 и Φ_2 , учитывая $n_1 = n_3 = 1$ и $n_2 = n$:

$$\Phi_1 = \frac{n-1}{nr_1}$$

$$\Phi_2 = -\frac{n-1}{r_2}$$

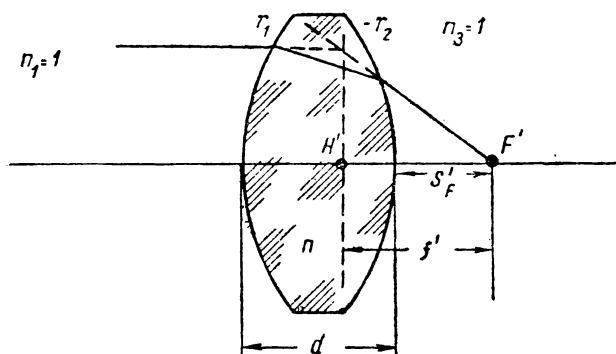


Рис. 33. Линза

После подстановки этих выражений в уравнение (28,4) получим:

$$\Phi = \frac{1}{f'} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{d(n-1)^2}{nr_1 r_2}. \quad (29,1)$$

Заднее вершинное фокусное расстояние s'_F найдется из выражения:

$$\operatorname{tg} \alpha_3 = \frac{h_3}{s'_F},$$

т. е. с учетом (28,2):

$$s'_F = \frac{1 - \Phi_1 d}{\Phi}, \quad (29,2)$$

или

$$s'_F = f' \left[1 - \frac{(n-1)d}{nr_1} \right], \quad (29,3)$$

$$s_F = -f' \left[1 + \frac{(n-1)d}{nr_2} \right]. \quad (29,4)$$

Находим положение главной плоскости от вершины линзы:

$$s'_H = -\frac{f'(n-1)d}{nr_1}. \quad (29,5)$$

Для нахождения переднего вершинного расстояния и положения передней главной плоскости необходимо вместо r_1 , подставить r_2 , т. е.

$$s_H = -\frac{f'(n-1)d}{nr_2}. \quad (29,6)$$

Пример 16. 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. Применим (29,1):

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

или

$$-f = f' = 18,35 \text{ мм.}$$

Вершинные расстояния найдем из (29,3):

$$s'_F = 16,57 \text{ мм}$$

и соответственно из (29,4):

$$s_F = -16,81 \text{ мм.}$$

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

$$-s'_H = f' - s'_F = 1,78 \text{ мм;}$$

$$s_H = -f + s_F = 1,54 \text{ мм.}$$

§ 30. Типы линз

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

1. Линзы, имеющие различные знаки радиусов кривизны поверхностей (би-форма). К таким линзам относятся *двояковыпуклые* и *двояковогнутые* линзы (рис. 34, а, б).

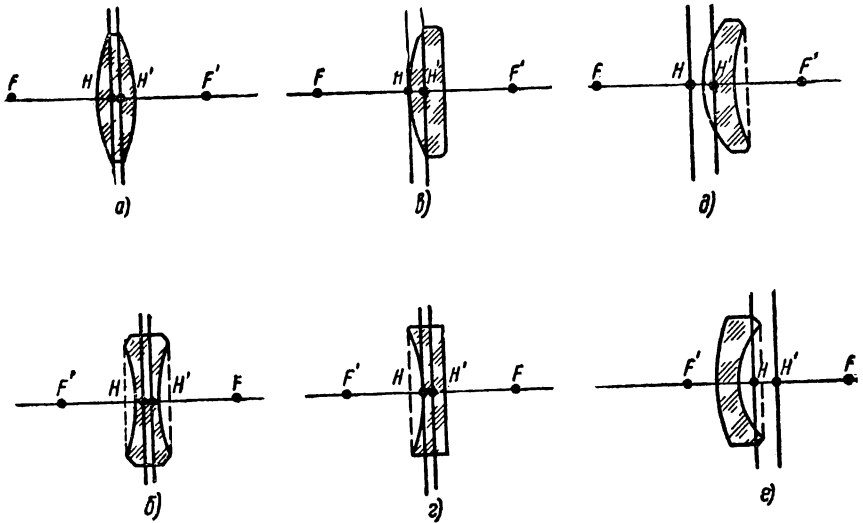


Рис. 34. Типы линз

2. Линзы, имеющие одну из поверхностей плоской (план-форма). Такие линзы называются *плоско-выпуклыми* или *плоско-вогнутыми* (рис. 34, в, г).

3. Линзы, имеющие одинаковые знаки радиусов кривизны поверхностей. Такие линзы называют *менисками* (выпукло-вогнутыми или вогнуто-выпуклыми) (рис. 34, д, е).

На рис. 34 показаны положения главных точек и точек главных фокусов. У всех линз передняя главная плоскость находится впереди задней.

Фокусные расстояния линз и положения главных плоскостей можно вычислить по формулам (29,1—29,6). 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 сере-

дине, а отрицательные — на краю. Поэтому малая толщина линз по краю характерна для положительных линз.

Если толщина линзы недостаточна, то сферические поверхности образуют острый край. Такая линза называется линзой с острым краем. Ее диаметр можем найти по формуле:

$$D_{\text{ок}} = 2 \sqrt{2r_1 h_1 - h_1^2}, \quad (30,1)$$

где

$$h_1 = \frac{d^2 + 2r_2 d}{2(d - r_1 + r_2)}, \quad (30,2)$$

стрелка прогиба поверхности.

Рассмотрим некоторые виды линз:

а) *Линза с равными радиусами разных знаков.* В формулу (29,1) подставим $r_1 = -r_2 = r$:

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

и окончательно:

$$\frac{1}{f'} = \frac{n-1}{nr^2} (2nr - nd + d). \quad (30,3)$$

Такая линза может быть двояковыпуклой или двояковогнутой.

б) *Линза с одной плоской поверхностью.* Подставив в формулу (29,1) $r_2 = \infty$, получим:

$$\frac{1}{f'} = \frac{n-1}{r}. \quad (30,4)$$

Знак радиуса определяет знак фокусного расстояния. Формула (30,4) называется формулой плоско-выпуклой (или плоско-вогнутой) линзы.

в) *Линза-шар.* В шаровой линзе $r_1 = -r_2 = r$, а толщина линзы $d = 2r$. Подставив эти значения в формулу (29,1), получим:

$$\frac{1}{f'} = \frac{2(n-1)}{nr}. \quad (30,5)$$

г) *Линза с равными радиусами.* Такая линза относится к группе менисков. Подставив в формулу (29,1) $r_1 = r_2 = r$, получим:

$$\frac{1}{f'} = \frac{(n-1)^2 d}{nr^2}. \quad (30,6)$$

д) *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 (29,1) преобразуем, подставив вместо d равную ей величину $r_1 - r_2$:

$$\frac{1}{f'} = \frac{(n-1)(r_2 - r_1)}{r_1 r_2} + \frac{(n-1)^2 (r_1 - r_2)}{nr_1 r_2}$$

или

$$\frac{1}{f'} = \frac{(n-1)(r_2 - r_1)}{nr_1 r_2}$$

и, наконец

$$\frac{1}{f'} = \frac{n-1}{n} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (30,7)$$

е) *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 пойдет параллельно оптической оси. Оптическая сила такой линзы равна нулю. Чтобы выполнить это условие, в формуле линзы (29,1) следует положить:

$$(n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = - \frac{(n-1)^2 d}{nr_1 r_2}.$$

В этом случае подстановка даст:

$$r_2 = r_1 - \frac{(n-1)d}{n}. \quad (30,8)$$

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

$$d = \frac{(r_1 - r_2)n}{n-1}. \quad (30,9)$$

Линза относится к группе менисков.

ж) *Гиперболическая линза.* Гиперболической линзой называется линза, у которой одна или обе поверхности являются гиперболическими. Наиболее часто применяется положительная плоско-выпуклая линза, позволяющая получить гомо-

центрический пучок лучей для бесконечно удаленной точки на оси оптической системы.

Уравнение поверхности определяется выражением:

$$y^2 = x^2(n^2 - 1) + 2x(n - 1)f'. \quad (30,10)$$

Такая линза своей плоской поверхностью обращена к предмету.

з) *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 изображений, 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 будет:

$$y^2 = 2(s'_F + d)x \frac{n-1}{n} - x^2 \left(\frac{n^2-1}{n^2} \right) \quad (30,11)$$

и

$$r_2 = s'_F. \quad (30,12)$$

Линза относится к группе менисков.

Пример 17. 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 (30,2) и (30,1):

$$h_1 = 3,64 \text{ мм}$$

и

$$D_{ок} = 33,34 \text{ мм.}$$

Пример 18. Найти фокусное расстояние концентрической линзы с радиусами кривизны 35 и 30 мм из стекла с $n = 1,52$.

Решение. Применяя (30,7),

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

§ 31. Наклонные плоскости предметов и изображений

Бесконечно тонкая оптическая система с оптической осью представлена в виде двух слившихся вместе главных плоскостей H и H' , рис. 35.

Плоскость предметов AB наклонена к главной плоскости на угол φ_p , а плоскость изображений $A'B'$ — к главной плоскости на угол φ_t . Требуется доказать, что $A'B'$ есть изображение AB .

Наклонная плоскость предметов отстоит от системы по оптической оси на расстояние $OP = -a$, а плоскость $A'B'$ — на расстояние $OP' = a'$. Точки P и P' являются точками сопря-

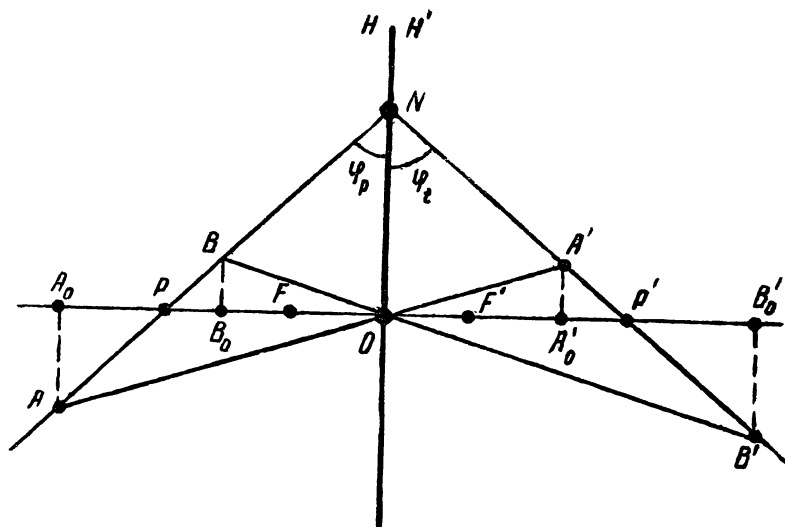


Рис. 35. Плоскость предметов наклоне к оптической оси

женными. Из точки A направим в оптическую систему два луча, один из них через 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. Тогда и весь отрезок $A'B'$ будет сопряжен отрезку AB . Отсюда следует, что обе сопряженные плоскости предметов и изображений всегда пересекают главные плоскости объектива в направлении N , пер-

пендикулярном чертежу. Между углами φ_p и φ_f имеем (из рис. 35) зависимость:

$$\operatorname{ctg} \varphi_f = - \frac{a \operatorname{ctg} \varphi_p}{a'} \quad (31,1)$$

или

$$\operatorname{ctg} \varphi_p = - \beta \operatorname{ctg} \varphi_f. \quad (31,2)$$

Из рис. 35 следует, что в пределах плоскости изображения $A'B'$ существуют различные линейные увеличения, наибольшие по направлению B' , перпендикулярно чертежу, и наименьшие по направлению A' , также перпендикулярно плоскости чертежа.

Обозначив $OA_0 = -a_1$ и $OB_0 = -a_2$, а также $OA_0' = a_1'$ и $OB_0' = a_2'$, запишем:

$$\beta_{\min} = \frac{a_1}{a_1'}, \quad (31,3)$$

$$\beta_{\max} = \frac{a_2}{a_2'}. \quad (31,4)$$

Зная величину предмета AB (или AP) и угол наклона плоскости предметов φ_p , нетрудно определить a_1 и a_2 , а затем по формуле (22,8) найти a_1' и a_2' .

§ 32. 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, объективов 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 шели любого спектрального прибора. Щель обычно имеет 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 резуль-

тате большая часть изображения светового тела ложится на непрозрачную часть щели и не используется.

Применением оптических систем с цилиндрическими линзами или особыми приемами 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,

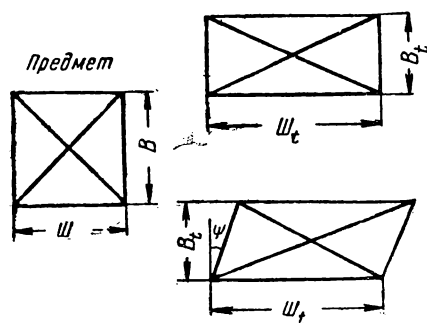


Рис. 36. Виды трансформированных изображений

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_v — коэффициент высоты,

$$K_v = \frac{B_t}{B}; \quad (32, 1)$$

а отношение ширины трансформированного изображения $Ш_t$ к ширине самого предмета $Ш$ через K_m — коэффициент ширины (рис. 36).

$$K_m = \frac{Ш_t}{Ш}. \quad (32, 2)$$

Отношение коэффициента ширины к коэффициенту высо-

ты назовем коэффициентом анаморфозы (коэффициент трансформирования):

$$K_a = \frac{K_{ш}}{K_b} = \frac{Ш_t B}{Ш B_t}. \quad (32,3)$$

Наклонное (ромбовидное) изображение также является одним из видов трансформированного. Наклон изображения характеризуется угловым отклонением ψ средней осевой вертикальной линии предмета.

Известно много методов для получения трансформированного изображения. На рис. 37 схематически показаны различные методы, нашедшие себе применение в практике трансформирования оптического изображения.

Если перед плоскостью предметов или плоскостью изображений (рис. 37, а) поместить цилиндрическую линзу, то действие цилиндрической линзы в двух взаимно-перпендикулярных направлениях будет неодинаковым. 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 друг относительно друга мало, а пучки лучей достаточно узкие.

Аналогичное действие возникает и при применении отражающей цилиндрической поверхности (рис. 37, б).

Если объектив, проектирующий предмет l_1 (рис. 37, 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 же действует как плоскопараллельная пластина; во взаимно-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. 37, г) по системе Кретгена нашли себе применение в широкоэкранном 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 сис-

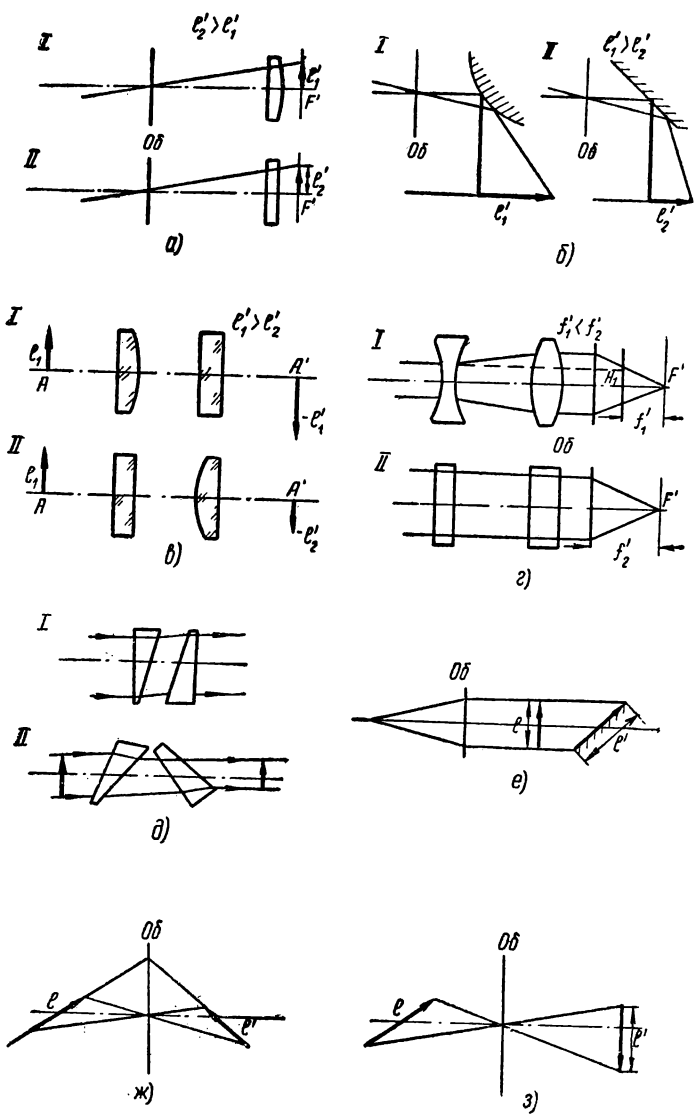


Рис. 37. Получение трансформированных изображений: а—метод преломляющей цилиндрической поверхности; б—метод отражающей цилиндрической поверхности; в—метод цилиндрического объектива; г—метод цилиндрической афокальной приставки; д—призменный метод; е—теневого метод; ж—оптический метод (двухэтапный); з—ракурсный метод (двухэтапный)

тему, а в направлении II действуют как плоскопараллельные пластины.

Если фокусное расстояние первого компонента приставки f_1' , а второго — f_2' , то коэффициент анаморфозы приставки определится выражением:

$$K_a = -\frac{f_1'}{f_2'}. \quad (32,4)$$

Афокальная цилиндрическая система приставляется к обычному киносъёмочному объективу и укорачивает его фокусное расстояние, в другом же взаимно-перпендикулярном направлении она не изменяет фокусного расстояния объектива. Таким образом, при съёмке f_I в направлении I меньше f_{II} в направлении II и

$$f_I = f_{II} K_a. \quad (32,5)$$

В кинематографии большей частью применяют при съёмке $K_a = 0,5$. При проекции аналогичная, но другая система приставляется к обычному кинопроекторному объективу, положительным компонентом к объективу; тогда при проекции $K_a = 2$, а в результате на экране масштаб изображения в двух взаимно-перпендикулярных направлениях будет одинаковым. При киносъёмке происходит сжатие изображения по горизонтали, а при проекции — расширение. Тем самым удаётся на обычной нормальной 35-миллиметровой киноплёнке разместить изображение, которое в обычных условиях потребовало бы 70-миллиметровой киноплёнки.

Клин (см. рис. 20) позволяет получать трансформированное изображение, но один клин изменяет направление пучка, а его трансформирующее действие невелико. Применение двух клиньев (рис. 37, *д*) даёт 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 составная часть фотографического репродукционного объектива.

Обычные оптические системы круговой симметрии также позволяют получать трансформирование изображения. Простейшим способом является трансформирование в параллельном пучке лучей (рис. 37, *е*). Если на пути параллельного пучка, полученного с помощью любого объектива, поставить полупрозрачный негатив, то на экране получится трансфор-

мированное теневое изображение, пропорциональное косинусу угла наклона экрана.

Наклонные плоскости предмета и изображения (рис. 37, 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 (способ Максимовича) 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. 37, 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 пятая
ОБЩИЕ СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

§ 33. Основные характеристики оптического прибора

Оптический прибор позволяет человеку рассматривать изображения предметов в другом масштабе. Эти изображения могут быть увеличены или уменьшены, сильно или слабо освещены, в том или ином цвете. 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 образовать хорошее или удовлетворительное по резкости изображение. Главными оптическими свойствами 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.

§ 34. 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 пространство предметов по направлению к оптической системе выходят пучки лучей с весьма большими телесными углами. Но в оптическую систему попадают лишь пуч-

ки 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 будут ограничивать пучки световых лучей. Все эти оправы будут выполнять 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*.

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. 38).

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

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 действующая или апертурная диафрагма. Таким образом, QQ' есть диаметр действующей (апертурной) диафрагмы. Если будем уменьшать ее диаметр, то пучок лучей будет симметрично уменьшаться в диаметре. 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 Q_0 , будет вызывать срезание верхней части пучка, а левее Q_0 — нижней ча-

сти 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. 39). Этот пучок лучей проходит через края действующей диафрагмы QQ' . Существует

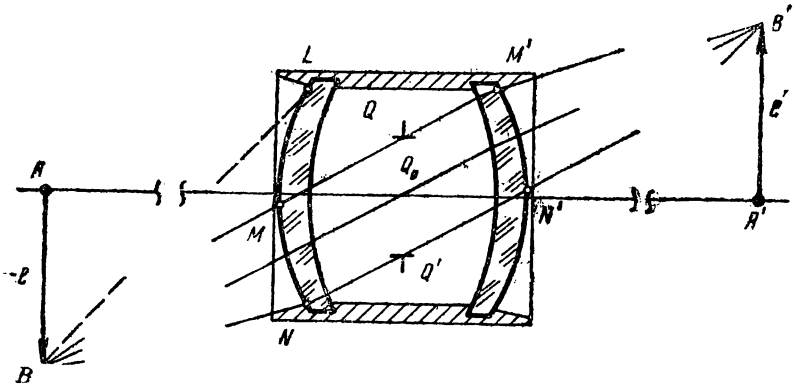


Рис. 38. Ход наклонного пучка лучей через оптическую систему

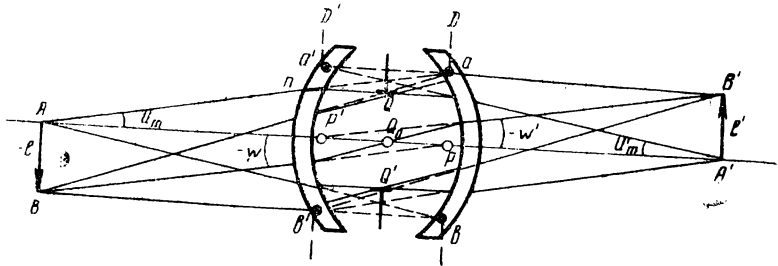


Рис. 39. Апертурная диафрагма

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 выйдут влево два луча, после преломления их продолжения пере-

секаются 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' .

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.

Если глаз человека поместить в точку A , то он увидит световое отверстие диафрагмы ab . Такое световое отверстие называется *зрачком входа* или входным отверстием. Зрачком входа называется отверстие, через которое световые лучи входят в оптическую систему. Оно может быть мнимым и действительным.

Если глаз человека поместить в точку изображения A' , то он увидит световое отверстие диаметром $a'b'$. Из этого отверстия как бы выходят световые лучи. Оно называется *зрачком выхода*, или выходным отверстием. Зрачком выхода 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.

Зрачок входа явился изображением действующей диафрагмы через переднюю половину оптической системы. Точка P — центр зрачка входа D — есть изображение точки Q_0 , центра действующей диафрагмы. Зрачок выхода явился изображением действующей диафрагмы через заднюю половину оптической системы. Точка P' — центр зрачка выхода, D' — изображение точки Q_0 , центра диафрагмы. Следовательно, зрачок выхода является изображением зрачка входа через всю оптическую систему.

Диаметр ab зрачка входа ограничивает размеры осевого пучка лучей. Если лучи идут параллельно оптической оси, то диаметр пучка равен диаметру зрачка входа. Если лучи идут из точки A , находящейся на конечном расстоянии от системы, то зрачок входа ограничивает телесный угол лучей. В главном сечении пучка, в плоскости чертежа, угол u_m называется *апертурным углом в пространстве предметов*. Таким же образом угол u'_m будет называться *апертурным углом в пространстве изображений*. Если лучи будут выходить из оптической системы параллельно оптической оси, то диаметр пучка лучей будет равен диаметру зрачка выхода.

Наклонный пучок падает в оптическую систему под некоторым углом ω к оптической оси. Если лучи идут из бесконеч-

не 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. 39), находящейся на конечном расстоянии от оптической системы, то все лучи этого пучка образуют с оптической осью различные углы. Угол поля зрения ω в этом случае будет определяться главным лучом, который направляется в центр зрачка входа. Остальные лучи с оптической осью будут образовывать углы: внутренние — большие, а внешние — меньшие.

В пространстве изображения аналогичным образом будем рассматривать углы *поля изображения* ω' . Пользуясь формулами (14,1) и (14,2), найдем линейное увеличение в зрачках:

$$\beta_p = \frac{D'}{D} = \frac{\operatorname{tg} \omega}{\operatorname{tg} \omega'}, \quad (34,1)$$

где D' — диаметр зрачка выхода, а D — диаметр зрачка входа.

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. 39 $A'B'$ есть радиус диафрагмы поля зрения. Диафрагма поля зрения выбирается такой величины, чтобы ограничивать круг резкого изображения, пригодного для использования.

§ 35. 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. Зрачок входа в оптической системе является одним и тем же основанием световых конусов лучей от различных точек предмета. Очевидно, что телесный угол становится тем меньше, чем дальше от оптической оси отстоит точка предмета, или, что то же самое, чем больше поле зрения.

При одном и том же зрачке выхода, расположенном вблизи оптической системы, который является основанием выходящего светового конуса лучей, невозможно получить одина-

ковые 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 оправами линз. На рис. 38 был показан объектив, в который проходит узкий

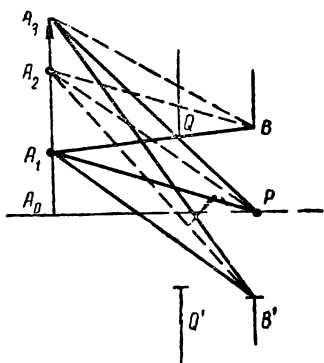


Рис. 40. Виньетирование

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. 40) в зрачок входа BB' падает пучок лучей. Перед зрачком входа находится диафрагма QQ' которая не влияет на прохождение этих лучей. Но 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 в зрачок входа BB' . В результате этого наблюдается явление постепенного затенения пучков лучей, поступающих в оптическую систему, вследствие срезания световых лучей оправами 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 абберационные трудности из-за необходимости исправлять абберации 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 фототрафических объективах и вчетверо — в сложных телескопических системах (в перископах).

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

На рис. 41 AB есть апертурная диафрагма. Через ее от-

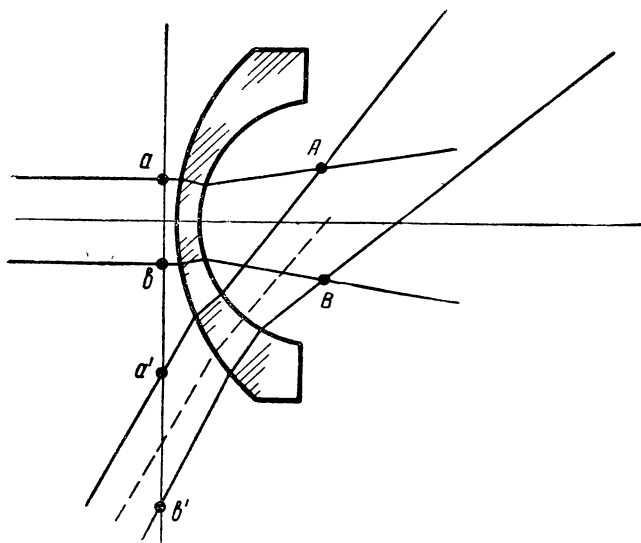


Рис. 41. Абберационное виньетирование

верстие 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. 38). 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. 41 h и m будут соответствовать:

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

Отношение этих отрезков и есть коэффициент виньетирования K_w :

$$K_w = \frac{m}{h}. \quad (35,1)$$

§ 36. 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. 42):

$$\Gamma = \frac{\text{tg } \gamma'}{\text{tg } \gamma}. \quad (36,1)$$

Если это отношение положительно, то оптическая система образует прямое изображение. На это указывает одинаковость знаков γ и γ' . Перевернутое (обратное) изображение оптической системы характеризуется различными по знаку углами γ и γ' , 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. 42), помещенный в точку B , видит предмет l под углом γ , а изображение l' этого предмета, образованное оптической системой, наблюдает с расстояния k' под углом γ' . При положении предмета в бесконечности

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

но одновременно

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

Если оптическая система расположена в однородной среде, то $\omega = \omega'$, а угол γ практически мало отличается от ω , тогда

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

и

$$\Gamma = \frac{f'}{k'}. \quad (36,2)$$

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

Для фотографических объективов вместо видимого увеличения применяют *масштаб* изображения. Масштабом изображения называется отношение 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 предмета к величине изображения. Для многих систем в таких случаях формула линейного увеличения заменяет формулу видимого увеличения.

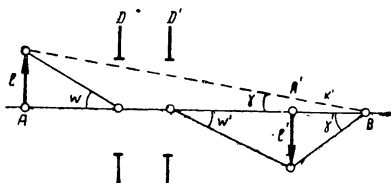


Рис. 42

§ 37. Потери света

Световой поток, падающий в оптическую систему, состоящую из преломляющих и отражающих поверхностей, не весь пройдет через нее, даже если виньетирование отсутствует. 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* τ .

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

$$\alpha = \frac{F_\alpha}{F} = 1 - \Theta', \quad (37,1)$$

где F — начальный поток излучения; F_α — поток излучения,

поглощенный данным телом; l — длина пути луча в стекле, выраженная в сантиметрах. Величина Θ 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 ρ . Коэффициентом отражения называется отношение потока излучения, отраженного данным телом, к потоку излучения, упавшего на него.

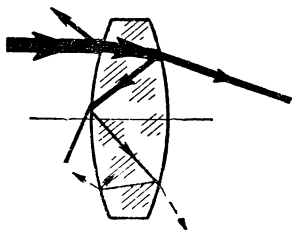


Рис. 43. Схема потерь света в линзе

Потери света на отражение и поглощение в линзе схематически показаны на рис. 43.

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

$$\rho = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(i - i')}{\sin^2(i + i')} + \frac{\operatorname{tg}^2(i - i')}{\operatorname{tg}^2(i + i')} \right]. \quad (37,2)$$

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

$$\rho = \frac{(n' - n)^2}{(n' + n)^2}. \quad (37,3)$$

Коэффициент пропускания для одной поверхности определяется формулой:

$$\tau = 1 - \rho. \quad (37,4)$$

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.

$$\tau = \prod_{k=1}^{k=m} (1 - \rho_k) \prod_{k=1}^{k=m+1} \Theta_k. \quad (37,5)$$

Величина ρ 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 (посеребренных, алюминированных) достаточно принять $\rho = 0,1$.

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

$$\tau = 0,96^{N_1} \cdot 0,95^{N_2} \cdot 0,9^{N_3} \cdot 0,99^l, \quad (37,6)$$

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

Потери света неприятны не только тем, что снижают 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, и свет, рассеянный средой стекла, является светом вредным, борьба с которым приобретает важное значение.

За последние 20 лет советским стекловарам 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. Гребенщикову 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 такая же, как и теория цвета тонких пластинок в отраженном свете, известная из физиче-

ской оптики. Толщина пленки приближенно определяется из формулы:

$$d = \frac{(2k + 1)\lambda}{4n}, \quad (37,7)$$

где λ — длина волны света, а $k = 0, 1; 3; 5$ 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 (37,3)

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

Преобразуя, получим при $n_1 = 1$:

$$n_2 = \sqrt{n_3}. \quad (37,8)$$

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 упрочнения слоя еще не решена, в связи с чем эти методы не рекомендуются для просветления наружных поверхностей. Просветление на основе использования легкогидролизующихся 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 4,5 до 5,5%.

Просветление оптических приборов дает хорошие результаты и применяется широко. Например, просветление фотографического объектива 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
Гидролизации	однослойный	4,5—5,5	0,8—2,5
	двухслойный		1—1,2
	трехслойный		0,2—0,6

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

$$\tau = 0,9^{N_4} \cdot 0,99^{l+N_4} \cdot 0,98^{N_5}, \quad (37,9)$$

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

Пример 19. Оптическая система состоит из зеркала с внутренним серебрением, из зеркала с внешним серебрением, из трех линз с $n = 1,54$, свободно расположенных в воздухе, и двух ахроматических двухлинзовых склеенных объективов со стеклами $n = 1,51$ и $n = 1,62$. Общая толщина оптического стекла по оптической оси составляет 77 мм (≈ 8 см). Определить коэффициент пропускания света и потери света.

Решение. В нашем случае $N_1 = 10$; $N_2 = 2$; $N_3 = 1$; $l = 8$. Применяя (37,6), получим

$$\tau = 0,96^{10} \cdot 0,95^2 \cdot 0,99^8 \cdot 0,9 = 0,498,$$

или потери составляют 50,2%.

§ 38. Основные фотометрические понятия

Светом или световым излучением называется та часть энергии излучения, которая воспринимается глазом. Глаз способен воспринимать свет в диапазоне длин волн от 400 до 760 *ммк*.

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

Основной единицей фотометрических величин является единица силы света I 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.

Под световым потоком F понимают мощность светового излучения, оцениваемую по световому ощущению, которое она производит. Источник света с силой I *св* излучает в окружающее пространство световой поток, равный:

$$F_0 = 4\pi I. \quad (38,1)$$

Здесь 4π есть полный телесный угол ω .

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

$$F = \omega I, \quad (38,2)$$

где ω — телесный угол (рис. 44), вырезающий из центра сферы с радиусом кривизны r на ее поверхности некоторую площадь S :

$$\omega = \frac{S}{r^2}. \quad (38,3)$$

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 ω и плоским u определяется соотношением:

$$\omega = 2\pi(1 - \cos u). \quad (38,4)$$

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 :

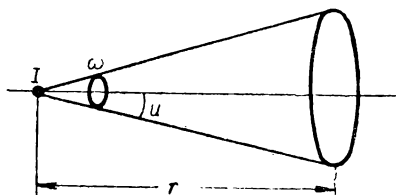


Рис. 44

$$E = \frac{F}{S}. \quad (38,5)$$

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

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

Подставим (38,2) и (38,3) в (38,5), тогда получим:

$$E = \frac{I}{r^2}. \quad (38,6)$$

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

$$E = \frac{I \cos i}{r^2} \quad (38,7)$$

(закон косинусов для освещенности поверхности).

В Англии и США за единицу освещенности принимают футсвечу: 1 *фут-св* = 10,764 *лк*.

Яркостью В называется поверхностная плотность силы света в заданном направлении, равная отношению силы света к

площади проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную к тому же направлению:

$$B = \frac{I}{S}, \quad (38,8)$$

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

$$B = \frac{I}{S \cos i}. \quad (38,9)$$

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:

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

где k — произвольный предельно малый множитель.

Нит — новая единица яркости, введенная с 1956 г. До этого времени единицей яркости был *стильб*. *Стильб* — это яркость равномерно светящейся плоской поверхности, испускающей свет силой в одну свечу с одного квадратного сантиметра. Таким образом, между *стильбом* и *нитом* существует зависимость:

$$1 \text{ стильб} = 10\,000 \text{ нит}.$$

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

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

$$B = \frac{\rho E}{\pi}, \quad (38,10)$$

где ρ — 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.

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

$$R = \frac{F_p}{S} \quad (38,11)$$

Между падающим на поверхность световым потоком и отраженным F_p существует зависимость:

$$F_p = \rho F, \quad (38,12)$$

где ρ — 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 20. 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

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

§ 39. Светосила

Светосилой оптического прибора принято называть величину, характеризующую освещенность изображения. 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, то освещенность его оценивается объективно и может быть определена в люксах.

В оптическую систему от малого элемента площади предмета δ (рис. 45) падает пучок света в пределах телесного угла, опирающегося на зрачок входа. Световой поток dF , вступающий от малого элемента δ равномерно светящейся поверхности с яркостью B 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 преломле-

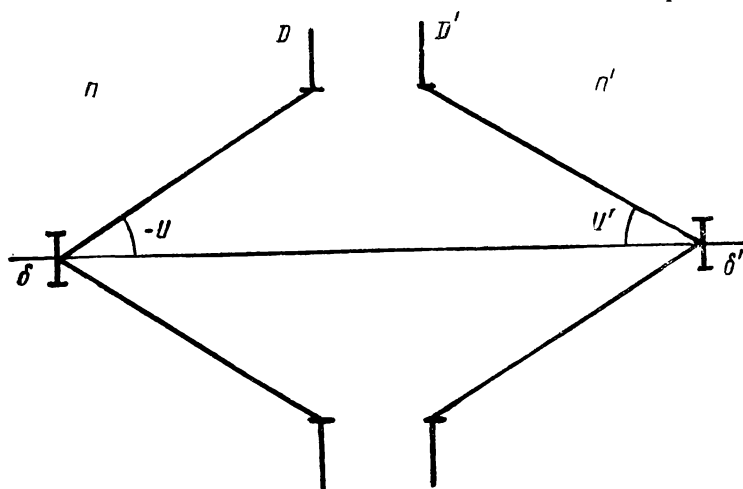


Рис. 45

ния n' , то яркость пучка зависит от коэффициента светопропускания τ и определяется выражением:

$$B' = \tau \left(\frac{n'}{n} \right)^2 B, \quad (39,1)$$

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

$$E' = \left(\frac{n'}{n_1} \right)^2 \pi B \tau \sin^2 u' \quad (39,2)$$

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:

$$E' = \frac{\pi B \tau}{4} \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \quad (39,3)$$

Отношение диаметра зрачка входа D к фокусному расстоянию f' называется *относительным отверстием*. Квадрат относительного отверстия называется *геометрической светосилой*, а произведение коэффициента светопропускания на геометрическую светосилу называется *физической светосилой*.

Для упрощения в дальнейшем написания формул введем величину, обратную относительному отверстию, и назовем ее *диафрагменным числом*:

$$V = \frac{f'}{D}. \quad (39,4)$$

Относительное отверстие принято обозначать следующим образом: 1:4,5; 1:6,3 и т. д. Соответствующие диафрагменные числа будут: $V = 4,5$; $V = 6,3$ и т. д.

Пример 21. Определить освещенность изображения в фокальной плоскости фотографического объектива с фокусным расстоянием 50 мм и отверстием 10 мм при съемке Луны, если $\tau = 0,65$.

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

Применяя (39,3), получим:

$$E' = 51 \text{ лк.}$$

§ 40. Освещенность по полю изображения

Найдем освещенность по полю изображения, если известна освещенность в центре поля. Оптическая система представлена в виде зрачка выхода диаметром D' . Яркость предмета постоянна. Расстояние от зрачка выхода 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 ω_0 и освещает бесконечно малый элемент площади изображения δ_0' на оптической оси системы (рис. 46). Аналогичным образом световой поток F_w' распространяется внутри телесного угла ω_w и освещает элемент площади изображения δ_w' в точке K' , удаленной от оптической оси.

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

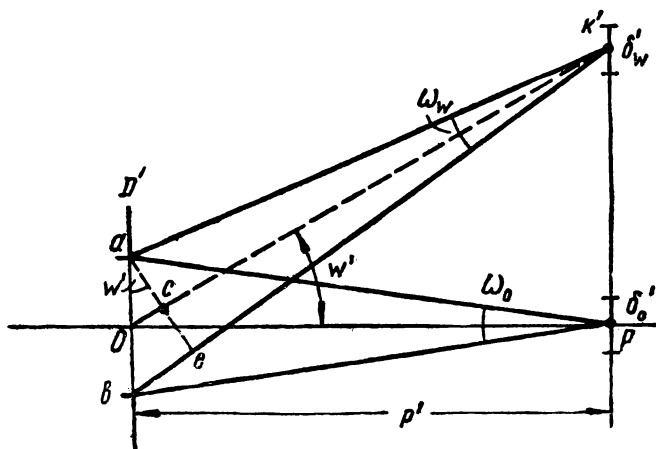


Рис. 46

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

$$E'_w = E'_0 \cos^4 \omega' \quad (40,1)$$

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

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

$$E'_w = E'_0 K_w \cos^4 \omega' \quad (40,2)$$

Величина K_w может быть и больше единицы, являясь переменной в пределах рассматриваемого поля изображения.

Если этому коэффициенту дать значение обратной величины косинуса угла изображения, то тогда освещенность изображения будет пропорциональна косинусу третьей степени. Для такого частного случая будет справедлива формула:

$$E'_{\omega} = E'_0 \cos^3 \omega'. \quad (40,3)$$

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

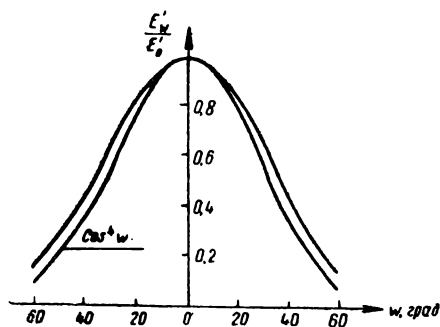


Рис. 47. Кривая падения освещенности изображения объектива «Руссар-25», 1 : 6,3, $2\omega = 110^\circ$

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. 47).

§ 41. 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 $2\omega = 12^\circ$, а поле зрения фотообъек-

тива Ю-8, $2\omega = 45^\circ$ Поле же зрения репродукционных и проекционных объективов определяется и в угловой мере (например, $2\omega = 45^\circ$) и в линейной (например, $70 \times 80 \text{ см}$). Поле зрения микроскопов определяется в линейной мере (например, $2l = 0,5 \text{ мм}$).

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

Размер диафрагмы определяется:

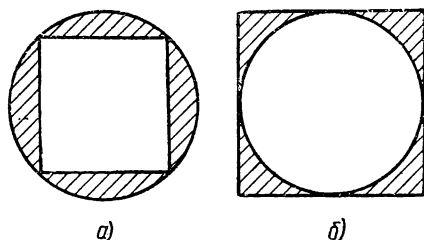


Рис. 48. Круг полезного изображения

1. Величиной резкого изображения, заметно неухудшенного aberrациями, 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 будет давать изображение практически непригодное для использования.

Центрированная оптическая система дает изображение в виде круга. Существует два метода использования полезного круга изображения. Тот или иной формат или вписывается в круг (рис. 48, а), или описывается около круга (рис. 48, 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 во многих аэрофотоаппаратах.

§ 42. Глубина изображаемого пространства

Глубиной оптической системы называется та часть пространства, в пределах которой предметы или изображения представляются наблюдателю резкими. Различают глубину в пространстве предметов (глубина изображаемого пространства) и глубину в пространстве изображений (глубина резкости). В основе их лежат одинаковые представления, а имен-

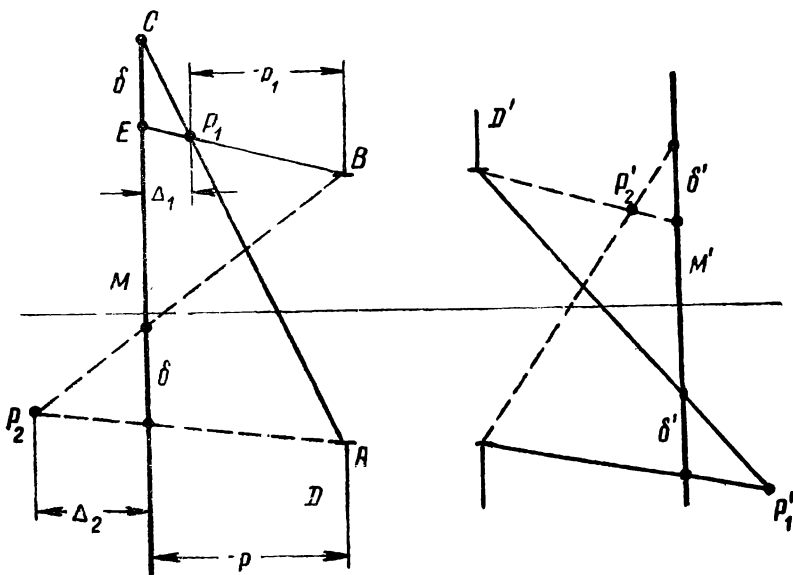


Рис. 49. Глубина в пространстве предметов

но: способность глаза человека видеть изображения, образованные кружками рассеяния, в виде резких точечных изображений.

Рассмотрим оптическую систему, изображенную в виде зрачков входа и выхода (рис. 49).

Допустим, что плоскость M' оптически сопряжена с плоскостью M . Точки P_1 и P_2 будут проектироваться на плоскость изображения M' в виде кружков рассеяния δ' . 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 бу-

дет видеть резко точки P_1 и P_2 . Глубина в пространстве предметов будет определяться формулой:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2, \quad (42,1)$$

где Δ_1 — передняя глубина Δ_2 — задняя глубина.

Плоскость M называется плоскостью наводки.

Из подобия треугольников CEP_1 и P_1VA имеем:

$$\frac{\delta}{D} = -\frac{\Delta_1}{p_1}.$$

Заменяя $p_1 = p + \Delta_1$ и преобразуя, получим:

$$\Delta_1 = -\frac{\delta p}{D + \delta}. \quad (42,2)$$

Аналогичным образом найдем заднюю глубину:

$$\Delta_2 = -\frac{\delta p}{D - \delta}. \quad (42,3)$$

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

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

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

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

Подставляя в (42,2) и (42,3), получим:

$$\Delta_1 = -\frac{p^2 \operatorname{tg} \psi}{D - p \operatorname{tg} \psi} \quad (42,4)$$

и

$$\Delta_2 = \frac{p^2 \operatorname{tg} \psi}{D + p \operatorname{tg} \psi}. \quad (42,5)$$

Подставляя в (42,1), получим:

$$\Delta = \frac{2Dp^2 \operatorname{tg} \psi}{D^2 - p^2 \operatorname{tg}^2 \psi}. \quad (42,6)$$

Найдем такое положение плоскости наводки, начиная с кото-

рого и далее от оптической системы все предметы изображаются резко, т. е. $\Delta_2 = \infty$.

Для этого необходимо, чтобы

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

или

$$p = -\frac{D}{\operatorname{tg} \psi}$$

Это выражение назовем «началом бесконечности», обозначим его p_∞ :

$$p_\infty = -\frac{D}{\operatorname{tg} \psi}. \quad (42,7)$$

Определим переднюю глубину Δ_1 для такого положения плоскости предметов.

В (42,4) вместо p подставим p_∞

$$\Delta_1 = \frac{\frac{D^2}{\operatorname{tg}^2 \psi} \operatorname{tg} \psi}{D + \frac{D \operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg} \psi}} = \frac{D}{2 \operatorname{tg} \psi},$$

или

$$\Delta_1 = -\frac{p_\infty}{2}. \quad (42,8)$$

(42,2) и (42,3) преобразуем, заменив в них величины δ и D через известные:

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

Тогда

$$\Delta_1 = \frac{p^2\delta'V}{f'^2 - \delta'Vp} \quad (42,9)$$

и

$$\Delta_2 = \frac{p^2\delta'V}{f'^2 + \delta'Vp} \quad (42,10)$$

Мы получили рабочие формулы для расчета глубины изображаемого пространства.

Пример 22. 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 линий на миллиметр.

Решение. Дано: $f' = 50$ мм; $p = -5000$ мм; $V = 3,5$. Данной разрешающей способности в линейной мере соответствует:

$$\delta' = 0,04 \text{ мм.}$$

Применяя (42,9) и (42,10);

$$\Delta_1 = 1,09 \text{ м,}$$

$$\Delta_2 = 1,94 \text{ м}$$

и полная глубина

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = 3,03 \text{ м.}$$

§ 43. Глубина резкости

Пучок лучей, выходящий из зрачка выхода оптической системы (рис. 50), образует изображение в точке A' в плоскости изображения M' . Ближе и дальше этой плоскости на рас-

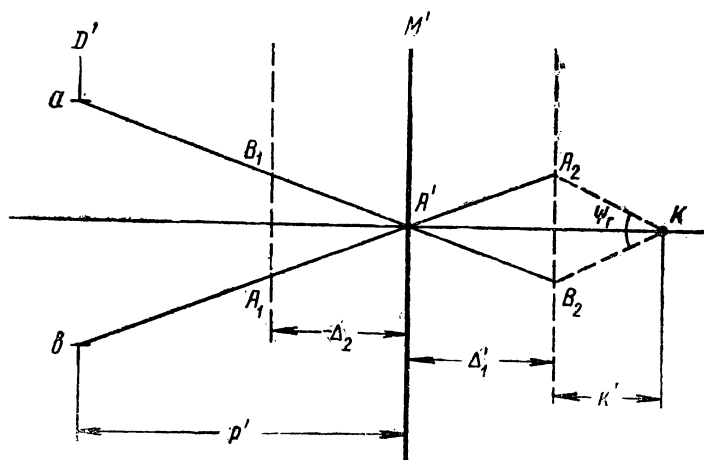


Рис. 50. Глубина в пространстве изображений

стояниях Δ_1' и Δ_2' точка будет образовываться в виде кружка рассеяния $\delta' = A_1B_1 = A_2B_2$.

Из рис. 50 следует, что $\Delta_1' = -\Delta_2'$ и глубина в пространстве изображений будет равна:

$$\Delta' = 2\Delta_1'.$$

Из подобия треугольников abA' и $A'A_2B_2$ следует:

$$\frac{\delta'}{D'} = \frac{\Delta'_1}{p'} . \quad (43,1)$$

Из треугольника $A'A_2B_2$: $\delta' = k' \operatorname{tg} \psi_r$. Угол ψ_r есть предельный угол разрешающей способности глаза, а k' — расстояние, с которого наблюдается изображение. Подставив последнее выражение в предыдущее и преобразовав, получим:

$$\Delta'_1 = \frac{p'k' \operatorname{tg} \psi_r}{D'} . \quad (43,2)$$

Отсюда получим уравнение глубины в пространстве изображений в общем виде:

$$\Delta' = \frac{2p'k' \operatorname{tg} \psi_r}{D'} . \quad (43,3)$$

В пределах Δ' можно смещать плоскость изображения, а изображения предметов, расположенных в одной плоскости, будут оставаться для глаза резкими.

Если рассматриваются изображения бесконечно удаленных предметов, то $p' = f'$, а k' есть расстояние наилучшего зрения 250 мм.

Тогда

$$\Delta' = \frac{500f' \operatorname{tg} \psi_r}{D'} ,$$

или, учитывая (39,4),

$$\Delta' = 500\sqrt{\nu} \operatorname{tg} \psi_r . \quad (43,4)$$

Если изображение фотографируется, то δ' определяется из предела разрешающей способности в линиях на миллиметр. Тогда из соотношения (43,1) имеем, при $p' = f'$:

$$\Delta'_1 = \frac{\delta'f'}{D} , \text{ или } \Delta'_1 = \sqrt{\nu}\delta' . \quad (43,5)$$

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

$$\Delta' = 0,02\sqrt{\nu} . \quad (43,6)$$

Рассмотрение вопроса о глубине 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 величины порядка 0,05 — 0,1 мм.

Глава шестая

КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

§ 44. Роль аберраций в образовании изображений

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 аберрацией.

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

В области нулевых лучей образуется безаберрационное изображение. Такое изображение позволяет найти положение плоскости изображения M' (рис. 51), 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, например, только вверх от оси, так как вниз от оси так же, как и в других меридиональных плоскостях, существуют одинаковые условия для преломления лучей.

Из точки B , удаленной от оптической оси, выходит наклон-

ный 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 .

Более точное знание структуры точек изображения дают внемеридиональные или косые лучи, представляющие боль-

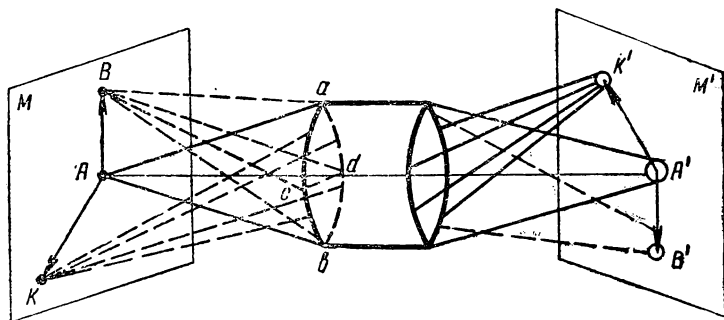


Рис. 51. Образование изображений широкими пучками лучей

шинство широкого пучка лучей. Этот пучок лучей опирается на все отверстия и его частными лучами являются меридиональные и сагиттальные лучи. Косые лучи не лежат в меридиональной плоскости. Такие лучи показаны выходящими из точки K . Любой пучок лучей 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 изображения. Но геометрические размеры их еще не указывают на достаточность приближения изображения реальной оптической системы к идеальной. Обычно, размеры этих кружков и пятен достаточно велики и для определения истинной картины изображения необходимо знать в них распределение световой энергии. Действительно, если преобладающая часть световой энергии соберется в одну точку, то эта точка, а не остальные лучи, будет определять изображение. В

другой части пятна рассеяния образуется изображение с несравненно меньшей световой интенсивностью.

Но вычисление распределения световой энергии в «точке» изображения весьма сложно, поэтому к таким вычислениям прибегают в исключительных случаях. В практике вычисления оптических систем ограничиваются рассмотрением аберраций осевых и наклонных меридиональных и сагиттальных лучей. Даже вычисление косых лучей применяется в особых случаях преимущественно в фотографических объективах новых типов или конструкций.

При создании всякого рода наблюдательных приборов (зрительные трубы, микроскопы и т. п.), работающих совместно с глазом, 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. Фотографические (а иногда и проекционные) системы 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 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. Существует три 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 *проекционными*. 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: киносъемочные объективы, фотографические объективы, спектрографы и др.

Глаз человека выполняет важную роль в наблюдении изображения, являясь в большинстве случаев судьей в определении качества изображения. Если недостатки оптической системы в изображении не могут быть обнаружены глазом человека, то такие изображения будут представляться совершенными. Следовательно, знание разрешающей способности глаза для тех или иных случаев наблюдения позволит более близко подойти к определению допустимых кружков или пятен рассеяния. Например, если для визуальных приборов за предел разрешения глаза в угловой мере принимают 30—60 секунд, то для проекционных систем в условиях кинотеатра 2—3 минуты.

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

1. Способность оптической системы отдельно передавать одно изображение от другого. Это свойство называется *разрешающей способностью*.

2. Способностью 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 хотя и различимы, но не выглядят резкими. Такая оптическая система будет иметь высокую разрешающую способность, но плохое качество изображения, так как не выполнено второе условие.

Качество изображения оптической системы определяется ее аберрациями. При рассмотрении аберраций различают:

1) сферическую аберрацию, 2) отступление от условия синусов, 3) сферическую аберрацию наклонного пучка лучей, 4) меридиональную кому, 5) сагиттальную кому, 6) аберрации косых лучей, 7) астигматизм, 8) кривизну поля, 9) дисторсию, 10) сферическую аберрацию в зрачках, 11) хроматизм положения, 12) хроматизм увеличения, 13) хроматическую разность сферических аберраций, 14) хроматическую аберрацию наклонного пучка лучей.

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

Сферическая аберрация наклонного пучка лучей, меридиональная кома, дисторсия и сферическая аберрация 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.

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 волн, выходящих из точки предмета вне оптической оси.

§ 45. Сферическая aberrация

Под сферической aberrацией принято понимать aberrацию пучка лучей, выходящих из точки предмета, расположенной на оптической оси. 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. 52).

Первую плоскую поверхность линзы лучи проходят без преломления. Вторую поверхность они встречают под весьма значительными углами падения. Вследствие этого наиболее удаленные от оптической оси лучи преломляются всего сильнее и образуют точку схода, наиболее удаленную от фокальной плоскости. Расстояние по оптической оси между точками схода нулевых и крайних лучей называется *продольной* сферической aberrацией.

$$\delta s' = s'_k - s'_F. \quad (45, 1)$$

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 (45,1) приобретает вид:

$$\delta s' = s'_k - s'_0. \quad (45,2)$$

В плоскости изображения получаем кружок рассеяния, диаметр которого δ' с достаточной точностью находим из выражения:

$$\delta' = \frac{2h_1 \delta s'}{a'}, \quad (45,3)$$

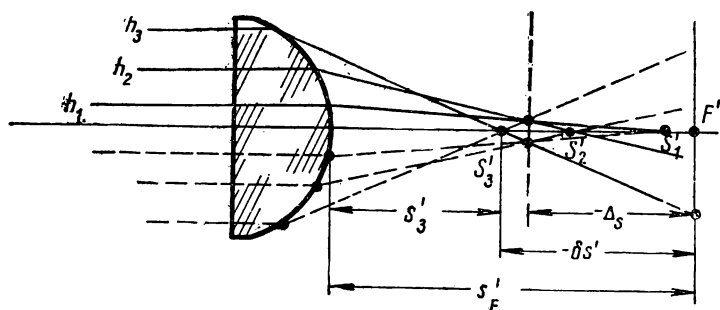


Рис. 52. Сферическая aberrация

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

Наименьший диаметр кружка рассеяния образуется на расстоянии Δ_s от плоскости изображения. Плоскость, соответствующую наименьшим кружкам рассеяния, называют *плоскостью наилучшей наводки*. 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 наводки, найденная по геометрическому наименьшему диаметру кружка рассеяния, является практически наилучшей плоскостью изображения.

Сферическая aberrация положительной линзы отрицательна, а отрицательной линзы — положительна. Комбинация из двух линз, одной положительной и одной отрицательной, поз-

воляет осуществить объектив, отличающийся несравненно меньшей сферической aberrацией.

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

Для построения характеристической кривой продольной

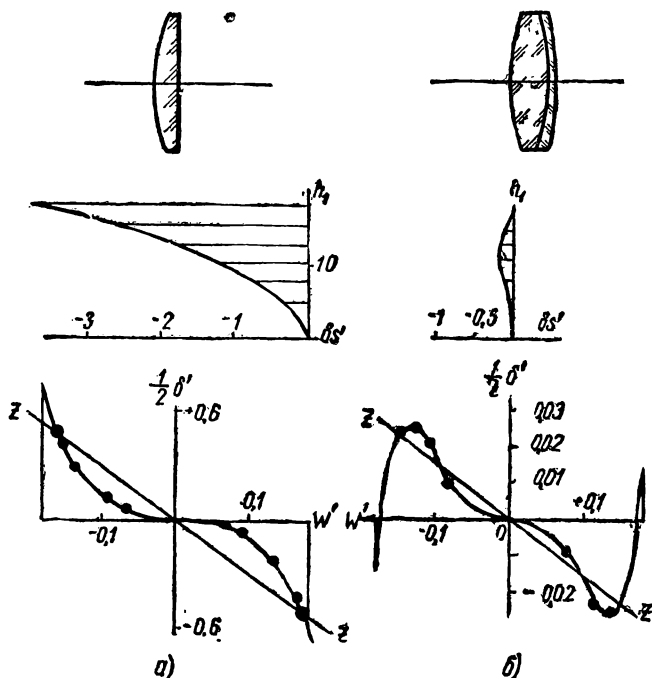


Рис. 53. Характеристические кривые сферической aberrации: сверху—продольные aberrации, внизу—поперечные aberrации а) $f'=100$; $l: 2,7$; $r_1=52$; $r_2=\infty$; $d=6,6$; $n=1,52$; б) $f'=100$; $l: 2,7$; $r_1=62,61$; $r_2=-44,612$; $r_3=-126,34$; $d_1=11$; $d_2=2$; К8; ТФ2

сферической aberrации по оси абсцисс откладывают продольную сферическую aberrацию $\delta s'$, а по оси ординат—высоты лучей на зрачке входа 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. 53 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 скорректированной 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 недокорректированной. Если же вся характеристическая кривая сферической aberrации или ее большая часть находилась бы вправо от оси ординат, aberrация была бы положительной и называлась бы перекоорректированной.

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 удельным весом влияния небольшого участка площади зрачка по сравнению со всем отверстием. Эти вспомогательные прямые позволяют определить положение плоскости наилучшей наводки.

Тангенсы угла наклона этой прямой указывают на величину смещения плоскости наилучшей наводки. Изображая поперечные aberrации так, как показано на рис. 53, Δ_s можно вычислить по формуле*:

$$\Delta_s \cong \frac{\delta'}{\alpha'} . \quad (45,4)$$

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 явится как бы новой ординатой для кривой, относительно которой можно определять попереч-

* Д. С. Волосов. Методы расчета сложных фотографических систем. Гостехиздат, 1948, стр. 186.

ные aberrации в плоскости наилучшей наводки. Так, например, для одиночной линзы будем иметь поперечные aberrации (кружок) в 0,3 мм, а для объектива 0,01 мм.

Если сферическая aberrация уничтожена (корректирована) для края зрачка входа, то величина Δ_s может быть определена по формуле:

$$\Delta_s \cong 0,8\delta s'_{\text{зоны}}. \quad (45,5)$$

Зоной зрачка входа называют ординату на зрачке, равную 0,35 D . Для этой высоты луча сферическая aberrация обычно приобретает наибольшее значение, если для края отверстия она равна нулю.

§ 46. 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 aberrация 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:

$$n'l \sin u = n'l' \sin u', \quad (46,1)$$

или через линейное увеличение:

$$\beta = \frac{n \sin u}{n' \sin u'}. \quad (46,2)$$

Обозначая через β — линейное увеличение для нулевого луча, а через β_k — вычисляемое для конкретного луча, выходящего из точки на оси оптической системы, получим отступление от закона синусов:

$$\delta\beta = \beta_k - \beta. \quad (46,3)$$

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

$$\delta f' = \frac{h_k}{\sin u_k} - f'. \quad (46,4)$$

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

абберации не уничтожены. Такое условие получило наименование *изопланатизм*, а его выражения явились обобщением закона синусов.

В ряде случаев, выполнение условий апланатизма и изопланатизма позволило получить достаточно хорошие практические результаты, в частности улучшить качество 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 aberrаций наклонных пучков лучей и, в частности, сферической aberrации наклонного пучка лучей и меридиональной комы.

Точки, в которых отсутствует сферическая aberrация 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.

§ 47. Кома

Кома есть aberrация широкого пучка лучей, наклоненного в оптической оси. Из точек *B* и *K* (рис. 51) выходят пучки лучей, опирающиеся на зрачок входа оптической системы. Лучи этих пучков образуют в плоскости изображения в двух взаимно-перпендикулярных направлениях, меридиональном и сагиттальном, несимметричное пятно рассеяния, которое и характеризует кому. Кому в меридиональном сечении, называют *меридиональной*, в сагиттальном сечении — *сагиттальной*.

Основной причиной комы является, как и в случае сферической aberrации, 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. 54, *a*), а верхние слабее. Здесь показана меридиональная кома, характерная для одиночной положительной линзы.

Несимметричность пятна рассеяния в меридиональной плоскости определяется формулой:

$$K = \frac{l'_{+m} + l'_{-m}}{2} - l'_{r.л.} \quad (47,1)$$

Меридиональная кома отсутствует в том случае, если уравнение (47,1) равно нулю. Но этого условия недостаточно для образования совершенного изображения. На рис. 54, а мы ви-

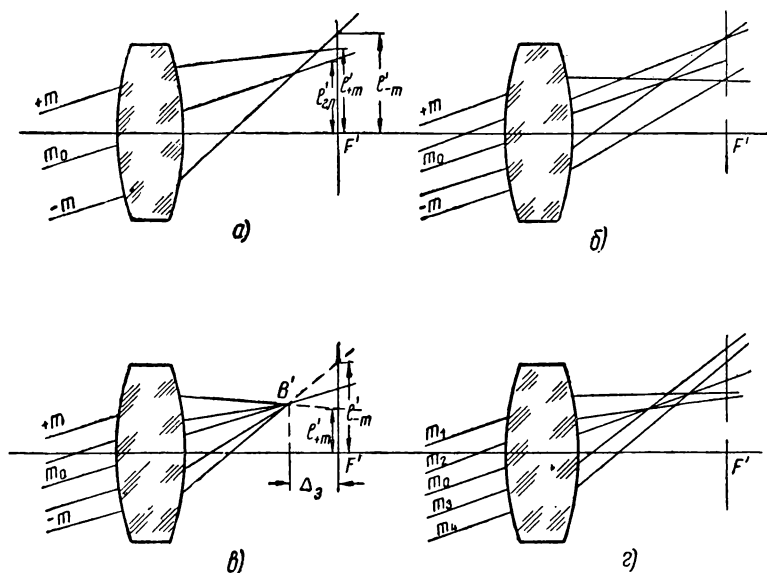


Рис. 54. Аберрации наклонного пучка лучей

дим в плоскости изображения F' большое пятно рассеяния, обусловленное сферической аберрацией. Возможен и такой случай, когда все меридиональные лучи пересекаются вблизи точки B' (рис. 54, в) таким образом, что меридиональная кома, определяемая уравнением (47,1), равна нулю. Но в плоскости изображения нет одной точки, а есть пятна рассеяния $\delta' = l'_{-m} - l'_{+m}$.

Если каждая пара лучей будет пересекаться в плоскости изображения (рис. 54, б), но точки пересечения не будут лежать на главном луче, тогда будет отсутствовать сферическая аберрация пар лучей, и мы получим меридиональную кому в чистом виде. Только в том случае, если все лучи пересекают-

ся в одной точке и эта точка находится в плоскости изображения, отсутствуют и меридиональная кома, и сферическая aberrация наклонного пучка лучей в меридиональной плоскости. Аналогичным образом можно рассмотреть явление и в сагитальной плоскости.

Из рассмотрения рис. 54 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. 54, з), направляющихся в зрачок входа оптической системы. Вверх от главного луча ординаты получают положительное значение, а вниз — отрицательное. Результаты вычисления дают ординаты этих лучей в плоскости изображения. Откладывая по оси ординат величины изображений различных лучей для одного и того же первоначального наклона, или их разности от геометрической величины изображения, а по оси абсцисс углы луча в пространстве изображений с оптической осью, получим характеристическую кривую комы. Эта кривая позволяет судить о степени коррекции оптической системы на aberrации наклонного пучка лучей.

Погрешность отдельного луча определяется:

$$\delta l' = l'_m - l' \quad (47,2)$$

Эта формула справедлива и для меридиональной, и для сагитальной плоскости. Индекс m означает ординату на зрачке входа.

Характеристическая кривая aberrаций наклонного пучка лучей в меридиональной плоскости показана на рис. 55. Вспо-

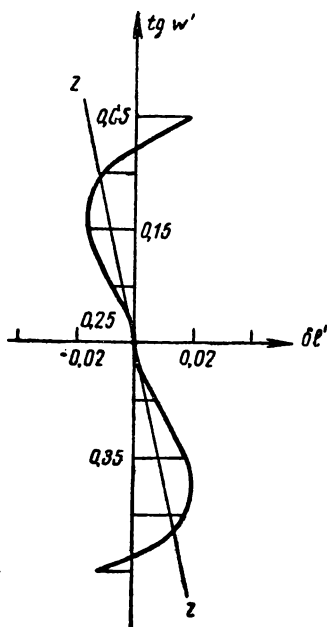


Рис. 55. Характеристическая кривая aberrаций наклонного пучка лучей в меридиональной плоскости

могательная прямая zz указывает на положение плоскости наилучшей наводки Δ_s для данного угла наклона лучей. Очевидно, что для случая, показанного на рис. 54, b , 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 наводки должна быть в одном и том же месте. Отсюда вытекает условие: на-

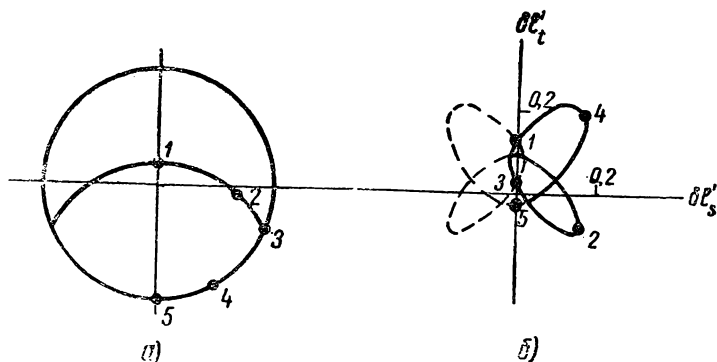


Рис. 56. Аберрации косых лучей: a — координаты на зрачке; b — контур пятна рассеяния

клоны вспомогательных прямых на всех графиках поперечных аберраций должны быть одинаковыми.

При изучении или вычислении реальных систем ограничиваются одним наклоном лучей в случае поля зрения до 3° , двумя наклонами при поле зрения 30° , тремя наклонами в случае поля зрения 60° 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 аберраций 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 изображения.

На рис. 56 показаны аберрации косых (внемеридиональных) лучей объектива «Инниар» $f' = 360$ мм, $1 : 3$, вычисленные для угла поля зрения 14°

Слева на зрачке входа показаны точки 1, 2, 3, 4 и 5, определяющие координаты лучей, для которых был построен контур aberrаций. Для точек 1 и 5 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 изображение будет безукоризненным.

§ 48. Астигматизм

Астигматизмом называется явление, которое заключается в том, что лучи одного и того же пучка, идущие по отношению друг к другу в двух взаимно-перпендикулярных плоско-

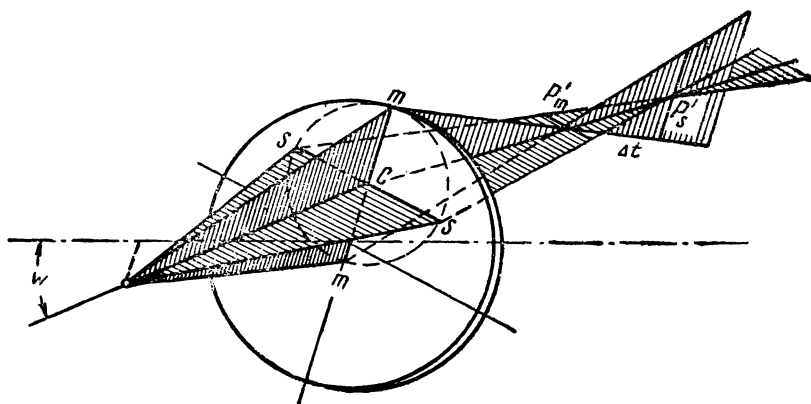


Рис. 57. Астигматизм

стях, 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. 57). Рассмотрим условия преломления лучей, как бы выделяемых крестообразной диафрагмой. Одни лучи, в меридиональной плоскости, падают на поверхность по меридиану mt , а другие, в сагиттальной плоскости, падают на параллель ss .

Так как кривизны по параллели и меридиану различны, то и преломление лучей будет различным. Лучи сагиттальные образуют точку схода P'_s . В этом месте изображение

будет представлено в виде вертикальной линии или овала. Лучи меридиональные пересекутся в точке P'_m . Здесь изображение будет иметь вид линии или овала, расположенного горизонтально. Астигматизм в изображении проявляется в том, что вертикальные и горизонтальные элементы изображаются различно, а точка стремится изобразиться в виде линии, а практически — в виде овала.

Расстояние между точками схода меридиональных и сагиттальных лучей Δt 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 неблагоприятное с центрированностью 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 от плоскости

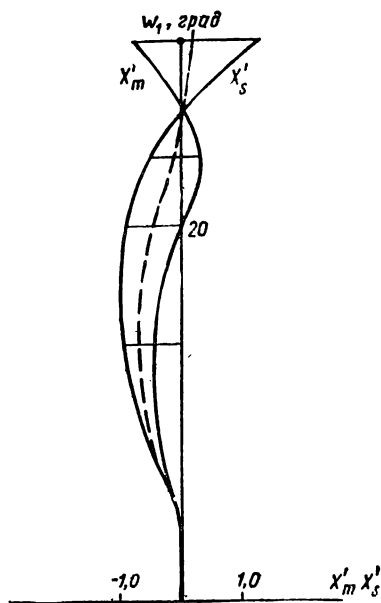


Рис. 58. Кривые aberrации астигматического бесконечно тонкого пучка объектива «Орто-Ниар» $f' = 180 \text{ мм}$, $1 : 7,7$

изображения. Найденные значения X'_m и X'_s позволяют построить характеристические кривые астигматизма, указывающие сечения фокальных поверхностей.

На рис. 58 показаны характерные для фотографических объективов кривые астигматизма объектива «Орто-Ниар» $f' = 180 \text{ мм}$, $1 : 7,7$, $2\omega = 58^\circ$, для положения предмета в бесконечности. Эти кривые показывают расположение фокальных

поверхностей и указывают на отступление от плоского изображения.

По середине 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. Величина погрешности X'_m или X'_s отождествляется с величиной x по формуле Ньютона (22,4):

$$x' = -\frac{(f')^2}{x}.$$

Найденную величину x' выразим в диоптриях по формуле (26,2), заменяя в ней f' через x' , а Φ через L_m (или L_s). Тогда получим, с учетом косинуса угла наклона лучей:

$$L_m = -\frac{1000X'_m}{f'^2} \cos \omega \quad (48,1)$$

и

$$L_s = -\frac{1000X'_s}{f'^2} \cos \omega. \quad (48,2)$$

Под f' обычно понимают фокусное расстояние окуляра, а под X'_m и X'_s — суммарные aberrации всей оптической системы в передней фокальной плоскости окуляра. Практика показывает, что для визуальных систем изображение остается хорошим, если L_m , L_s или разность между ними не превосходят двух диоптрий. Оптическая система, свободная от астигматизма, называется *анастигматом*.

§ 49. Дисторсия

Дисторсия есть aberrация, которая проявляется в том, что нарушается подобие изображения предмету. В этом случае отношение тангенсов углов поля зрения и поля изображения не сохраняет 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. В первом случае дисторсия называется *подушкообразной* или *положительной*,

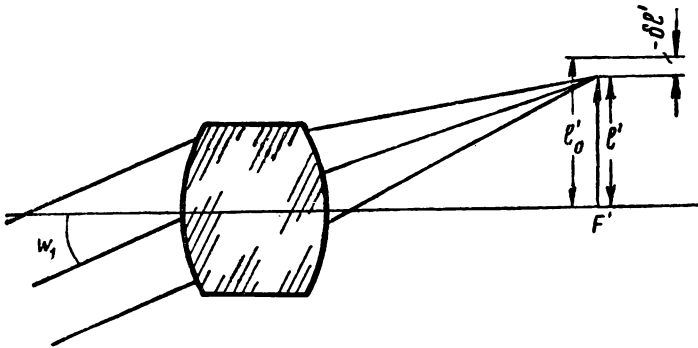


Рис. 59. Дисторсия

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

Абсолютная дисторсия, называемая *оптической*, выражается уравнением:

$$\delta l' = l'_k - l'_0. \quad (49,1)$$

Теоретическая величина изображения l'_0 (рис. 59) находится, опуская знак, по формуле (24,3):

$$l'_0 = f' \operatorname{tg} w_1. \quad (49,2)$$

Если предмет l_1 расположен на конечном расстоянии от си-

стемы, то l'_0 можем найти из формулы линейного увеличения (13,1). Величина изображения l'_k вычисляется или измеряется по главному лучу, проходящему через центр зрачка входа.

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

Подставив l'_0 из формулы (49,2) в уравнение (49,1), получим:

$$\delta l' = l'_k - f' \operatorname{tg} \omega_1. \quad (49,3)$$

В этой формуле величина f' может быть и не 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 получит вид:

$$\delta l' = l'_k - f'_k \operatorname{tg} \omega_1, \quad (49,4)$$

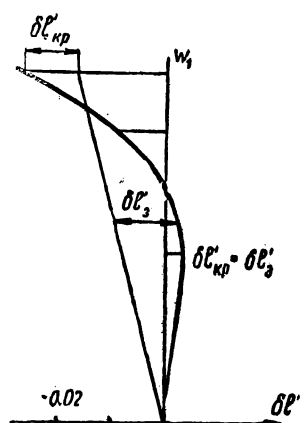
где f'_k — есть фотограмметрическое значение фокусного расстояния, в действительности указывающее на масштаб изображения.

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. 60, где по оси абсцисс отложены величины искажения $\delta l'$, а по оси ординат — углы поля зрения. График дисторсии позволяет от оптической дисторсии перейти 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 расстоя-

ний половинок объектива должно быть по абсолютной величине равно линейному увеличению. Часто объективы используются при различных увеличениях. Чтобы при этом не 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 зрачка выхода.



Для ее определения вычисляют главные лучи из центра действующей диафрагмы под одними и теми же углами, через левую и правую половинки объектива. Чтобы главный луч, направляющийся в центр зрачка входа, 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

Рис. 60. График дисторсии

условиях дисторсия объектива зависит от линейного увеличения в зрачках и углов поля зрения и изображения.

На рис. 61 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. Δ_1 и Δ_2 — сферическая aberrация в зрачках. H и H' — плоскости зрачков входа и выхода. В общем случае углы ω_1 и ω'_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. 61 следует:

$$l_1 = \text{tg } \omega_1 (t_1 - s_1).$$

Величина же теоретического предмета найдется по формуле:

$$l_0 = \text{tg } \omega_1 (t_1 + \Delta_1 - s_1).$$

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:

$$\delta l'_{II} = \Delta_2 \operatorname{tg} \omega'_k. \quad (49,5)$$

Но дисторсия передней половины объекта в плоскости изображения A' будет увеличена пропорционально увеличению:

$$\delta l'_I = -\Delta_1 \beta \operatorname{tg} \omega_1. \quad (49,6)$$

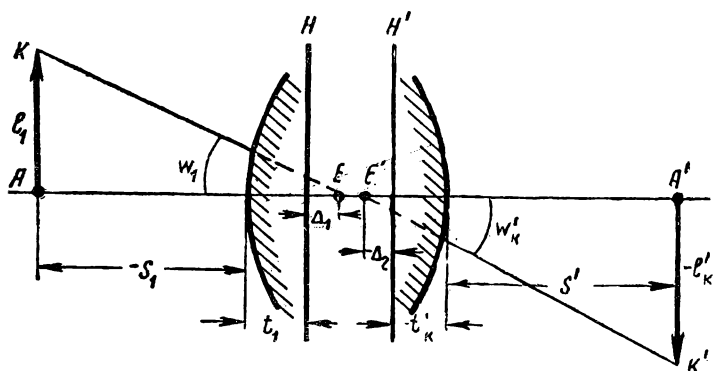


Рис. 61. Влияние сферической аберрации в зрачках на дисторсию

Дисторсия объектива в целом

$$\delta l' = \delta l'_I + \delta l'_{II},$$

$$\delta l' = \Delta_2 \operatorname{tg} \omega'_k - \Delta_1 \beta \operatorname{tg} \omega_1. \quad (49,7)$$

Если объектив строго симметричен, то $\Delta_1 = -\Delta_2$ и $\omega_1 = \omega'_k$, тогда, согласно уравнению (49,7),

$$\delta l' = \Delta_2 \operatorname{tg} \omega_1 (1 + \beta). \quad (49,8)$$

Пример 23. 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 (49,8)

$$\delta l'_2 = \frac{\delta l'_1 (1 + \beta_2)}{1 + \beta_1} = -0,16 \text{ мм.}$$

§ 50. Хроматическая aberrация

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

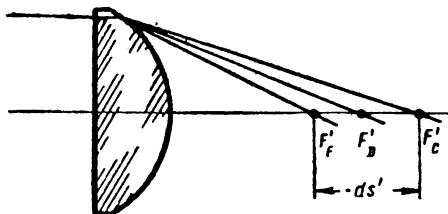


Рис. 62. Хроматическая aberrация

всех aberrаций для лучей с определенными длинами волн был бы весьма сложен, поэтому ограничиваются рассмотрением отдельных видов хроматической aberrации.

Основными видами 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 лучах рассматривают и астигматизм цветных лучей.

Хроматизм рассматривается для определенных лучей спектра. Таковыми лучами для приборов, работающих совместно с глазом наблюдателя, называемых *визуальными*, являются лучи в диапазоне длин волн от линии *F* с длиной волны 486 мкм и до линии *C* с длиной волны 656 мкм. Эти лучи для нашего глаза определяют видимый спектр.

Если приборы предназначаются для фотografiрования изображения в других лучах спектра: инфракрасных, ультра-

фиолетовых, 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. 62), 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:

$$ds' = s'_\lambda - s'_{0,D}. \quad (50,1)$$

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 луч D , а какой-нибудь иной, то вместо $s'_{0,D}$ принимается $s'_{0,\lambda}$.

Хроматическая aberrация положения одиночной тонкой линзы для бесконечно удаленного предмета может быть найдена путем дифференцирования формулы (29, 1), при $d=0$:

$$df'_{xp} = - \frac{dnf'}{n-1}.$$

Заменяя $\frac{n-1}{dn} = \nu$ по формуле (17, 2), получим:

$$df'_{xp} = - \frac{f'}{\nu} \quad (50,2)$$

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, удастся 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 графически, откладывая по оси ординат длины волн, а по оси абсцисс хроматическую aberrацию вдоль оптической оси. Характеристическая кривая хроматизма положения ахроматической системы показана на рис. 63.

Здесь для двух лучей спектра хроматизм отсутствует, например для лучей спектра G' и C или для лучей с длинами волн 450 и 620 мк.

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. 63, 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.

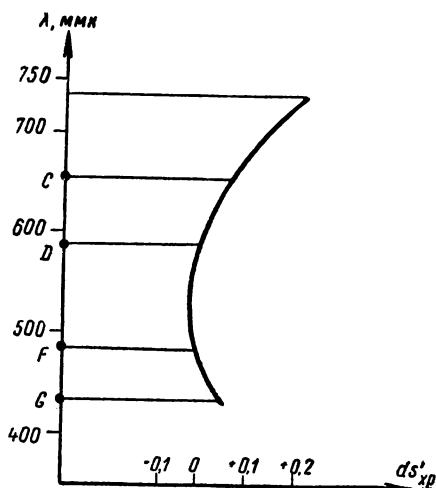


Рис. 63. Хроматизм положения и вторичный спектр

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. 64).

Но сферическая aberrация рассматривается для луча, принятого за основной цвет, например для луча D . Разность aberrаций для различных лучей спектра называется *хроматической разностью сферических aberrаций*. Она полностью характеризует резкость изображения точки на оптической оси.

Часто характеристические кривые хроматической разности сферических aberrаций показывают на графике вторичного

спектра (рис. 65). 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.

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. 66):

$$dl' = l'_F - l'_C, \quad (50,3)$$

или в общем случае:

$$dl' = l'_{\lambda_1} - l'_{\lambda_2}. \quad (50,4)$$

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. 67). В данном примере для главного луча хроматизм увеличения отсутствует, но хроматическая aberrация наклонных лучей значительна и можно предполагать, что изображение точки будет 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 в фотографических объективах, предназначенных для съемок на панхроматических и цветных светочувствительных материалах. В остальных случаях мы встречаемся с *актиничной*, или *фотографической*, коррекцией.

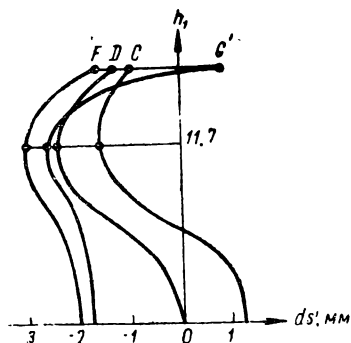


Рис. 64. Хроматическая aberrация репродукционного объектива «Индустар-11» $f' = 300$ мм, 1 : 9 для масштаба съемки 1 : 1

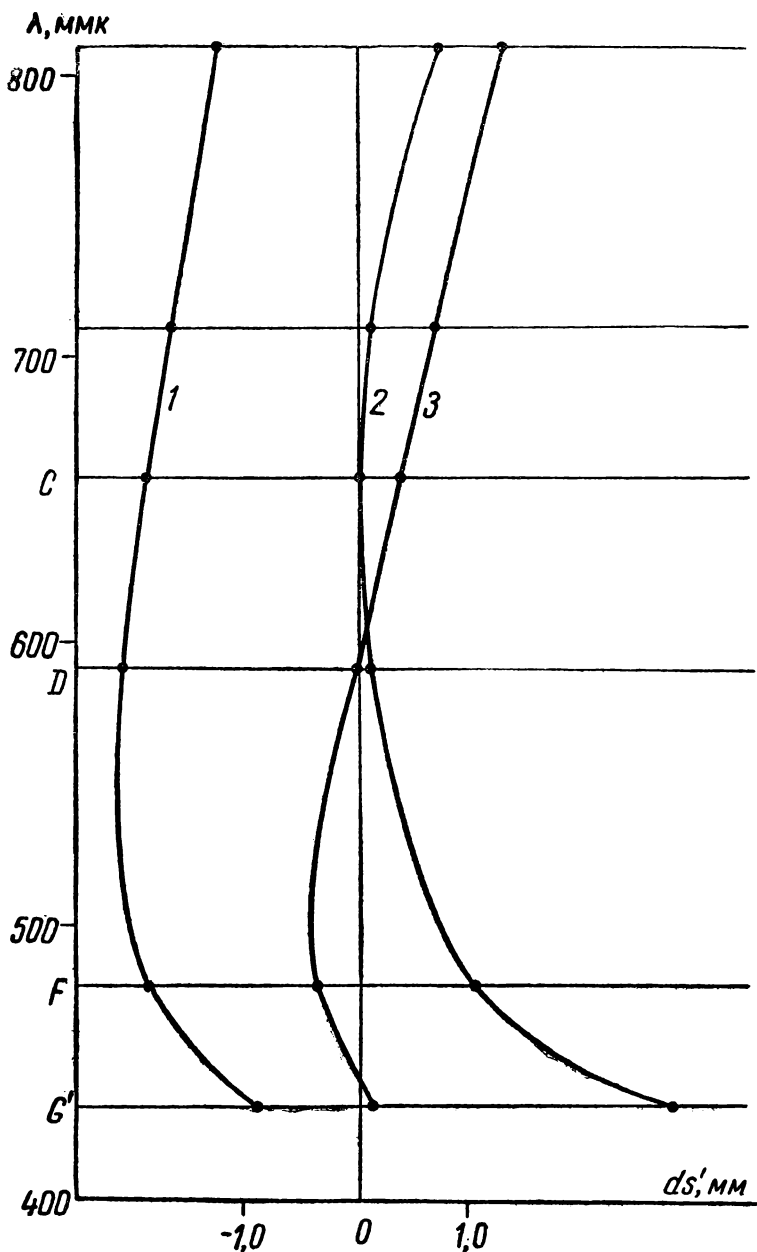


Рис. 65. Хроматическая aberrация фотообъектива «Индустар-17»: 1 — зона, 2 — край, 3 — ось

Фотографические объективы для обычной штриховой, тоновой и полутоновой съемки исправляются для лучей спектра D и G' , так как диапозитивные эмульсии мало чувствительны к красным лучам спектра.

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 рас-

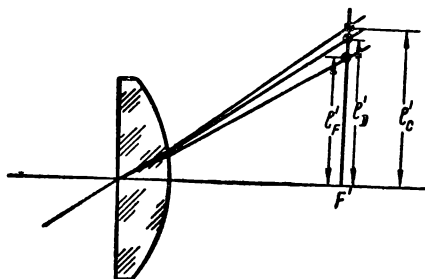


Рис. 66. Хроматизм увеличения

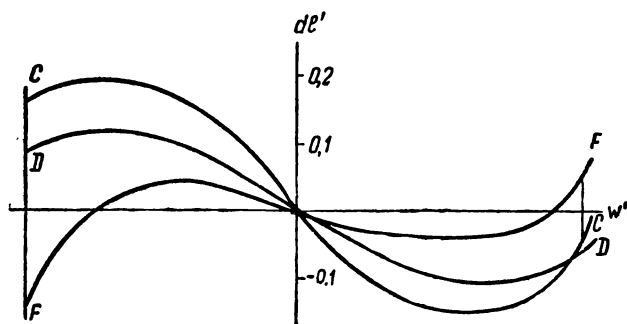


Рис. 67. Хроматическая разность aberrаций наклонных лучей

смаатривают совместно спектральные свойства светофильтров и 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. 68), с оптической силой, равной нулю. Показатели преломления ее составляющих для желтого луча D равны, но коэффициенты

дисперсии различны, вследствие этого она влияет на изменение хроматизма положения той системы, совместно с которой применяется.

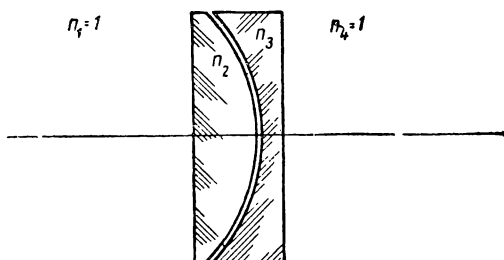


Рис. 68. Гиперхроматическая линза $f' = \infty$, $n_2 = n_3$; $v_2 \neq v_3$

§ 51. Разрешающая способность

Разрешающей способностью, или разрешающей силой, называется способность оптической системы разделять две точки друг от друга.

Если аберрации в системе полностью отсутствуют, то дифракция света устанавливает предел разрешению. Влияние дифракции света на разрешающую способность и теория последней рассматривается в физической оптике.

Для нахождения разрешающей способности объектива воспользуемся формулой разрешаемого углового расстояния для самосветящихся объектов*:

$$\sin \psi = \frac{1,22\lambda}{D}, \quad (51,1)$$

где D — диаметр зрачка входа. Этой формуле соответствует такое положение дифракционных колец в изображении, когда первое темное кольцо одного кружка проходит через центр другого.

Максимум спектральной чувствительности глаза соответствует $\lambda = 560$ мкм. Подставляя в (51,1) λ , выражая угол ψ в секундах, а диаметр зрачка входа в миллиметрах, будем

* Г. С. Ландсберг. Оптика. Гостехиздат, 1947, стр. 196.

иметь известную формулу, определяющую разрешающую способность объектива (в секундах):

$$\psi = \frac{140}{D} \quad (51,2)$$

В некоторых случаях, например в геодезии, принимают:

$$\psi = \frac{122}{D} \quad (51,3)$$

Опыт показал справедливость этой формулы. Реальные оптические системы не превзошли этот предел, но многие геодезические и астрономические объективы его достигли.

При рассмотрении необходимой разрешающей способности зрительных труб надо учитывать разрешающую способность глаза. За разрешающую способность глаза обычно принимают 60", хотя исследования* указывают на значительно большие возможности глаза. Так, например, глаз различает черные штрихи на белом фоне даже в том случае, когда их угловая величина достигает 6". Исходя из (36,1), имеем необходимую разрешающую способность зрительной трубы (в секундах):

$$\psi = \frac{60}{\Gamma}. \quad (51,4)$$

Учитывая (51,3), получаем зависимость между диаметром входного отверстия и видимым увеличением зрительной трубы, т. е. формулу *полезного* увеличения зрительной трубы:

$$\Gamma_n = 0,5D. \quad (51,5)$$

В действительности, для геодезических зрительных труб, для которых особенно важно полное использование разрешающей способности глаза, между диаметром входного отверстия и видимым увеличением существует в среднем зависимость (по данным зрительных труб СССР и Германии):

$$\Gamma_n = 0,74D. \quad (51,6)$$

Оценку разрешающей способности телескопических систем всегда производят в угловой мере. На рис. 69 показана характеристическая кривая разрешающей способности главной трубы триангуляционного теодолита, измеренная при наблю-

* С. В. Кравков. Глаз и его работа. Изд-во АН СССР, 1950, стр. 382.

дении без фильтра. Асимметрия кривой разрешающей способности является показателем нарушения центрированности оптической системы.

В табл. 2 указывается разрешающая способность некоторых отечественных приборов в центре поля.

Разрешающую способность фотографических объективов оценивают в линиях на миллиметр. Очевидно, что разрешаемое расстояние будет равно произведению фокусного расстояния объектива на тангенс разрешаемого угла ψ :

$$\delta = f' \operatorname{tg} \psi. \quad (51,7)$$

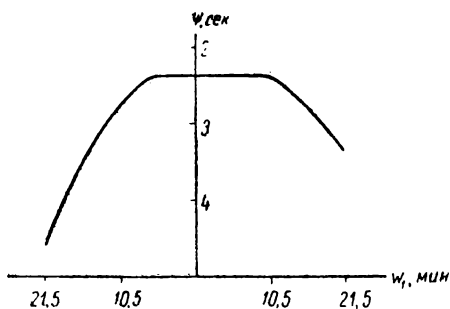


Рис. 69. Разрешающая способность главной трубы ТТ 2/6, 65*

Учитывая малые значения углов, заменим тангенс на синус, затем $\sin \psi$ из этой формулы подставим в (51, 1) и перейдем к числу линий (штрихов) на миллиметр:

$$N = \frac{1}{\delta} = \frac{D}{1,22\lambda f'}$$

Учитывая (39,4) и принимая $\lambda = 0,00056$ мм, получим:

$$N = \frac{1473}{\nu}, \quad (51,8)$$

т. е. разрешающая способность фотографического объектива зависит от относительного отверстия. Опыт показывает, что фотографические объективы в значительной степени не достигают этого предела. Основной причиной являются их значительные aberrации и недостаточная разрешающая способность фотослоя.

В табл. 2а приводятся некоторые данные, поясняющие состояние этого вопроса. Испытания объективов производились

на панхроматических фотографических эмульсиях со свето-
фильтром.

Таблица 2

Инструмент	Видимое увеличение	Диаметр зрачка входа	Разрешающая способность	
			теорети- ческая	действитель- ная
Главная труба триан- гуляционного теодо- лита 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 нивел- лир НПП	44	55	2",2	2",6

Таблица 2а

Объектив	f' , мм	Относитель- ное отвер- стие	Теоретическая разрешающая способность, линий на мм	Действитель- ная разрешаю- щая способ- ность в центре поля, линий на мм
Руссар 29	70	1:6,8	217	31
Руссар 33	100	1:7,8	193	29
И-51	210	1:4,5	328	25
И-13	300	1:4,5	328	25
И-52	500	1:5,0	295	27
Москва (ТФ-51)	600	1:5,0	295	27
ТЕ-51	700	1:6,3	234	29
Орион 1 ^а	200	1:6,3	234	33
И-23	110	1:4,5	328	28
Ю-8	50	1:2,0	736	32
Ю-9	85	1:2,0	736	26
Ю-11	135	1:4,0	368	34
РО-2	75	1:2,0	736	30

Большинство объективов имеет разрешающую способность
около 25—30 линий на миллиметр в центре поля.

Разрешающую способность рассматривают не только в центре поля, но и по всему полю изображения. Характеристическая кривая разрешающей способности одного из фотографических объективов показана на рис. 70; испытание производилось на мелкозернистой пленке. По оси ординат откладываются числа разрешающей способности, а по оси абсцисс — углы поля зрения или размер изображения.

Разрешающую способность оптических приборов определяют при помощи тест-объектов абсолютного контраста в ви-

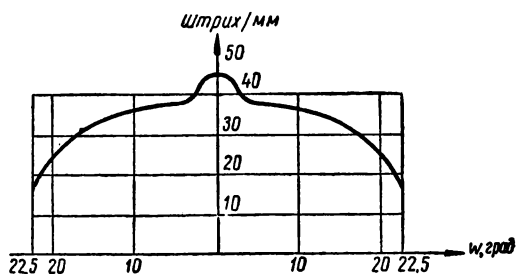


Рис. 70. График разрешающей способности фотографического объектива $f' = 600$ мм, относительное отверстие 1/16, масштаб съемки 1 : 10, фотоматериал МЗ

де, так называемых, мир. Различаются миры *штриховые* (рис. 71,а) и *радиальные*, (рис. 71,б). Штриховая мира представляет собой группу семейств разноразмещенных штрихов. Штрихи четырех семейств ориентированы друг по отношению к другу под углом 45° . 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 способности в угловой мере имеется простая зависимость:

$$\delta = p \operatorname{tg} \psi, \quad (51,9)$$

или

$$\delta = f' \operatorname{tg} \psi. \quad (51,10)$$

Мира может непосредственно наблюдаться на расстоянии p от глаза или объектива испытуемого прибора или устанавли-

ваться в фокальной плоскости объектива коллиматора с фокусным расстоянием f'

Разрешающая способность N в последнем случае будет определяться формулой:

$$N = \frac{1}{f' \operatorname{tg} \psi} \quad (51,11)$$

Штриховая мира весьма удобна для практических измерений разрешающей способности любых оптических приборов.

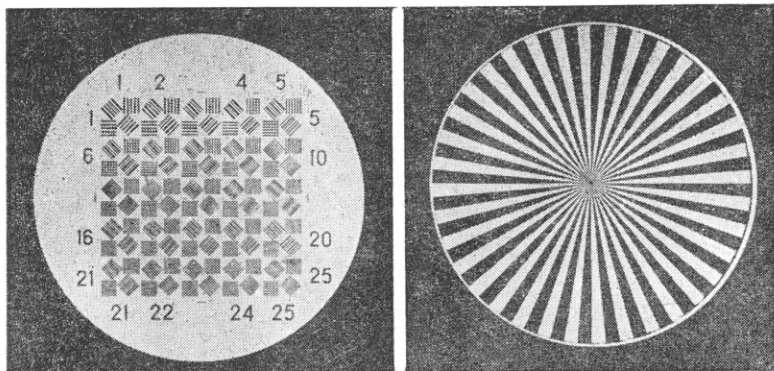


Рис. 71. Мира: *а* — штриховая, *б* — радиальная

Радиальная мира преимущественно применяется для испытания фотографических объективов. Допустим, что диаметр разрешаемого круга D . В пределах длины окружности πD имеется m черных штрихов. За величину разрешения, как и ранее, принимается расстояние между центрами черных (или белых) штрихов. Отсюда ширина штриха:

$$d = \frac{\pi D}{2m}, \quad (51,12)$$

а разрешаемое расстояние:

$$\delta = \frac{\pi D}{m}. \quad (51,13)$$

Переходя к числу штрихов на 1 мм, получим:

$$N = \frac{m}{\pi D}. \quad (51,14)$$

Дифракционная теория образования изображения в микроскопе позволяет указать пределы разрешения предметов, расположенных от оптической системы на конечном расстоянии. Л. И. Мандельштам показал, что в большинстве случаев условия разрешения самосветящихся объектов аналогичны равномерно освещенным*.

Наименьший предмет или деталь объекта, разрешаемые в микроскопе, определяются уравнением:

$$d \geq \frac{\lambda}{2A}. \quad (51,15)$$

Разрешающая способность оптической системы типа микроскопа пропорциональна апертуре A .

Пример 24. 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 (51, 14):

$$N = 22 \text{ лин/мм.}$$

§ 52. Вычисление двухлинзового склеенного объектива

Двухлинзовый склеенный объектив наиболее часто встречается во всевозможных оптических приборах. Простота конструкции, возможность коррегирования его на хроматическую и сферическую аберрации 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 условий изготовления объектива. Один из радиусов кривизны обеспечивает постоянство фокусного расстояния. Два других радиуса могут быть использованы как параметры для исправления аберраций. Таким образом, двухлинзовый склеенный объектив при заранее выбранной паре сортов оптического стекла как материала для деталей имеет два параметра для исправления аберраций. Этими двумя параметрами вместо радиусов для удобства вычислений являются углы α нулевого луча с оптической осью. Оперируя двумя парамет-

* Г. С. Ландсберг. Оптика. Гостехиздат, 1947, стр. 200.

рами, можно исправить какие-нибудь две aberrации. Таковыми обычно являются сферическая aberrация для луча, идущего по краю отверстия объектива, и хроматическая разность сферических aberrаций лучей спектра с длиной волны λ_1 и λ_2 (обычно C и F), идущих в объектив на высоте, равной $0,7$ высоты луча, идущего по краю отверстия.

Объектив (рис. 72) 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,

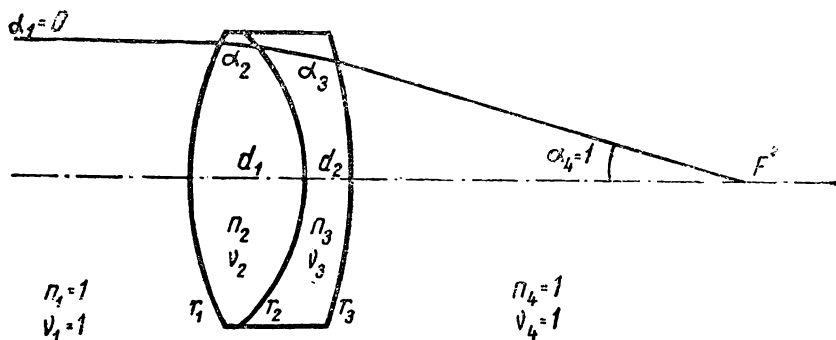


Рис. 72. Двухлинзовый склеенный объектив

но практически особых преимуществ комбинации «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 условия синусов. Однако практически оказывается возможным ограничиться немногими комбинациями марок оптического стекла.

Из теории aberrаций 3-го порядка известна формула хроматизма положения ($f' = h_1$; $\alpha_1 = 0$; $\alpha'_m = 1$):

$$ds'_{xp} = \sum_{k=1}^{k=m} h_k U_k, \quad (52,1)$$

где

$$U_k = \frac{\alpha_{k+1} - \alpha_k}{\mu_{k+1} - \mu_k} \left(\frac{1 - \mu_{k+1}}{\nu_{k+1}} - \frac{1 - \mu_k}{\nu_k} \right) \quad (52,2)$$

и

$$\mu_k = \frac{1}{n_k} \cdot \quad (52,3)$$

Из формулы (52,1), 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 фокусное расстояние примем за единицу ($f_1=1$). Так как $d=0$, то $h_1=h_2=h_3=1$, и хроматизм положения будет выражен уравнением:

$$\sum_{k=1}^{k=3} U_k = 0 \quad (52,4)$$

Раскроем значение U . Из (52,2) 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 (52,4), 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

$$\alpha_2 (1 - \mu_2) (\nu_2 - \nu_3) - \alpha_2 (1 - \mu_3) (\nu_2 - \nu_3) - (\mu_3 - \mu_2) \nu_2 = 0.$$

Разделив на $(\nu_2 - \nu_3)$ и обозначая

$$\varphi = \frac{\nu_2}{\nu_2 - \nu_3} \quad (52,5)$$

получим:

$$\alpha_3(1 - \mu_2) - \alpha_2(1 - \mu_3) - (\mu_3 - \mu_2) \varphi = 0. \quad (52,6)$$

Примем для углов α_2 и α_3 значения:

$$\alpha_2 = (1 - \mu_2)Q + \varphi; \quad (52,7)$$

$$\alpha_3 = (1 - \mu_3)Q + \varphi. \quad (52,8)$$

Значения α_2 и α_3 введем в (52,6) и докажем справедливость (52,7) и (52,8):

$$\begin{aligned} [(1 - \mu_3)Q + \varphi](1 - \mu_2) - [(1 - \mu_2)Q + \varphi](1 - \mu_3) - \\ - (\mu_3 - \mu_2) \varphi = 0. \end{aligned}$$

Преобразуя, получим тождество:

$$\varphi(\mu_3 - \mu_2) = \varphi(\mu_3 - \mu_2).$$

Следовательно, формулы (52,7) и (52,8) справедливы.

Эти формулы позволяют легко осуществить вычисление объектива тригонометрическим методом. Два параметра, Q и φ , позволяют исправить в объективе две аберрации. Коэффициент φ , зависящий от коэффициентов обратных относительных дисперсий ν , явится параметром хроматической аберрации, а Q — сферической аберрации.

Далее изложим порядок вычисления двухлинзового склеенного объектива на основе метода, разработанного Г. Г. Слюсаревым*. Здесь мы встретимся с некоторыми новыми обозначениями, смысл которых предварительно поясним.

Первые семь обозначений от W до P_0 соответствуют бесконечно тонкому объективу с $d_1 = d_2 = 0$.

W — параметр, характеризующий кому;

$P_{0, \min}$ — параметр, характеризующий сферическую аберрацию при минимуме сферической аберрации;

c_0 — параметр, характеризующий хроматическую аберрацию положения;

φ — коэффициент, характеризующий хроматическую аберрацию положения при $c_0 = 0$;

Q_0 — численный коэффициент для определения Q ;

l и t — величины, характеризующие высшие порядки сферической аберрации;

Q_0 — параметр, характеризующий сферическую аберрацию;

* Г. Г. Слюсарев. Методы расчета оптических систем. ОНТИ, 1937, стр. 360.

S_1 — коэффициент 3-го порядка, определяющий сферическую aberrацию;

S_{xp} — коэффициент 3-го порядка, определяющий хроматическую aberrацию положения;

ΔP — разность параметров P_0 , характеризующая хроматическую разность сферической aberrации, для лучей C и F ,

$$(\Delta P = P_{0,F} - P_{0,C});$$

ΔS_1 — поправка на S_1 , учитывающая влияние толщин линз на сферическую aberrацию;

a_2 и a_3 — углы нулевого луча с оптической осью;

A_1 и A_2 — численные коэффициенты для определения ΔS_1 ;

Q_1 — параметр, определяющий конструкцию систем в первом приближении;

ΔS_{xp} — поправка на S_{xp} , учитывающая влияние толщин линз на хроматическую aberrацию положения;

P — параметр, характеризующий сферическую aberrацию;

c — коэффициент, характеризующий хроматическую aberrацию положения;

φ_1 — параметр, характеризующий хроматическую aberrацию положения и являющийся зависимым от c , определяющего конструкцию системы;

P_{\min} — параметр, характеризующий сферическую aberrацию при минимуме сферической aberrации;

a , b и e — коэффициенты для определения P_{\min} и Q ;

Q_k — численный коэффициент для определения Q ;

Q — параметр, определяющий конструкцию системы, характеризующий сферическую aberrацию, являющийся зависимым от P ;

r — радиус кривизны поверхности;

h — высота нулевого луча на сферической поверхности;

l_0 — длина хода луча в призме;

u' — угол действительного луча с оптической осью, падающего на высоте $h_{кр}$ в пространстве изображений;

δf — отступление от условия синусов, определяемое по формуле:

$$\delta f' = f'_k - f';$$

ds' — хроматическая разность продольных сферических aberrаций.

Вычисление объектива покажем раздельно по операциям.

1. *Выбор марок оптического стекла линз объектива.* При относительном отверстии объектива более 1:5, например 1:4,5; 1:3,5 и т. д., рекомендуется выбрать марки стекол:

для первой, кроновой, линзы К8,
для второй, флинтовой, линзы ТФ1.

При относительном отверстии объектива менее 1:5, например, 1:6; 1:7,7 и т. д., рекомендуется выбрать марки стекол:

для первой, кроновой, линзы ТК2,
для второй, флинтовой, линзы Ф1.

2. *Установление толщин линз.* Толщина положительной (первой) линзы устанавливается с тем расчетом, чтобы при данном диаметре D толщина по краю была не менее чем величина d_0 , указанная в табл. 3.

Таблица 3

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:

$$d_1 = 0,75 \frac{D^2}{f'} + d_0,$$

округляя в сторону увеличения до целого числа.

Толщина второй отрицательной линзы устанавливается с тем расчетом, чтобы при ее изготовлении не происходило «коробления» цвета, т. е. линза была бы достаточно прочна, не прогибалась. Для этого толщину отрицательной линзы в зависимости от ее диаметра рекомендуется взять из табл. 4.

3. *Определение aberrаций объектива.* Вследствие сложности данного вопроса, ограничимся здесь лишь общими соображениями.

Обычно выбирают величину сферической aberrации $\delta s'$ для луча, падающего на объектив на высоте $h_{кр} = \frac{D}{2}$, и хроматическую разность сферических aberrаций $ds' = 0$, для лучей спектра C и F , идущих на высоте $h_3 = 0,7 h_{кр}$.

В случае малосветосильных объективов, с относительным отверстием не более 1:6, рекомендуется установить $\delta s' = 0$. В случае более светосильных объективов $\delta s'$ должна быть положительна и тем больше, чем больше относительное отверстие

Таблица 4

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

Таблица 5

Относительное отверстие	$\delta s', zf'$
	z
1:2,0	0,0150
1:2,2	0,0100
1:2,5	0,0080
1:2,7	0,0060
1:3,0	0,0040
1:3,3	0,0030
1:3,5	0,0020
1:4,0	0,0010
1:4,5	0,0006
1:5,0	0,0003

стие. Табл. 5 дает представление о величинах продольной сферической аберрации, имеющейся у ряда объективов с большим относительным отверстием, для луча, идущего по краю объектива.

Если за объективом установлена призма (эквивалентная плоско-параллельной пластине), то ее аберрации следует

учесть, принимая $\delta s'$ и ds' со знаком минус, так как aberrации призмы положительны. При этом сферическая aberrация призмы определяется по формуле:

$$\delta s' = \frac{1}{2} l_0 \frac{n^2 - 1}{n^3} \sin^2 u'$$

(для стекла марки К8 $\delta s' = 0,1863 l_0 \sin^2 u'$),

а хроматическая по формуле:

$$ds' = \frac{l_0}{v} \frac{n - 1}{n^2}$$

(для стекла марки К8 $ds' = 0,0035 l_0$).

4. Определение $h_{кр}$ и h_3 .

$$h_{кр} = \frac{D}{2} \quad \text{и} \quad h_3 = 0,35 D.$$

5. Нахождение $P_{0, \min}$ из табл. 6 для установленной комбинации марок стекол объектива (при $c_0=0$).

Таблица 6

Марка стекла		Первая линза					
		К8			ТК2		
		$P_{0, \min}$	φ	Q_0	$P_{0, \min}$	φ	Q_0
Вторая линза	Ф1	-1,00	2,36	-5,38	-0,34	2,80	-6,15
	Ф4	-0,76	2,28	-5,12	-0,41	2,67	-5,81
	ТФ1	-0,30	2,12	-4,65	-0,31	2,43	-5,18

6. Вычисление W по формуле:

$$W = 0,15 - \sqrt{\frac{-P_{0, \min}}{0,85}}$$

7. Нахождение коэффициентов высшего порядка сферической aberrации l и t по рис. 73 и рис. 74 при вычисленном W .

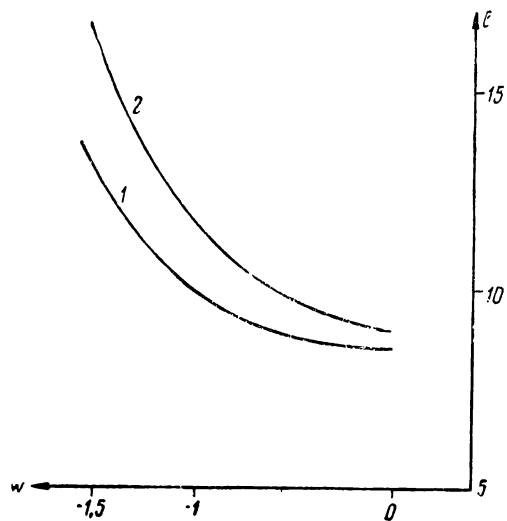


Рис. 73. Значение коэффициента l в зависимости от W при $P_0 = 0$, $1 - n = 1,5163$, $2 - n = 1,5724$

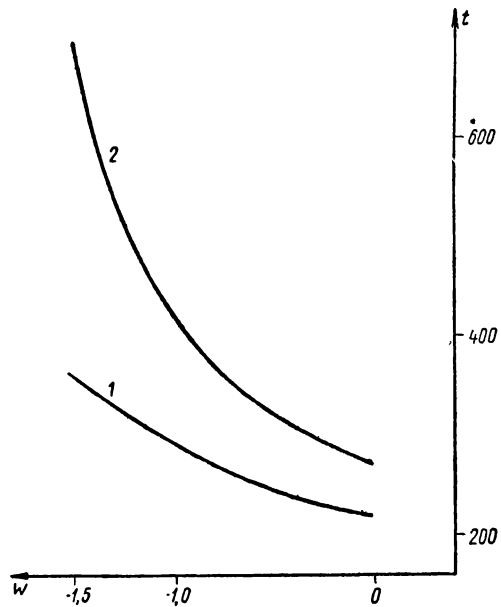


Рис. 74. Значение коэффициента t в зависимости от W при $P_0 = 0$, $1 - n = 1,5163$, $2 - n = 1,5724$

8. Вычисление S_1 из формулы:

$$\delta s' = -\frac{1}{2} S_1 \frac{h_{кр}^2}{f'} + l \frac{h_{кр}^4}{f'^3} + t \frac{h_{кр}^6}{f'^5}.$$

9. Нахождение ΔP из табл. 7.

Таблица 7

Марка стекла	К8	ТК2
Ф1	-0,34	-0,40
Ф4	-0,31	-0,37
ТФ1	-0,23	-0,26

10. Вычисление S_{xp} из формулы:

$$ds' = f' S_{xp} - \frac{h_3^2}{2f'} \Delta P.$$

11. Нахождение $P_{0, \min}$, φ и Q_0 из табл. 6, при $c_0 = 0$.

12. Вычисление Q_1 по формуле:

$$Q_1 = Q_0 + \sqrt{\frac{-P_{0, \min}}{2,4}}.$$

13. Вычисление α_2 и α_3 по формулам:

$$\alpha_2 = (1 - \mu_2) Q_1 + \varphi,$$

$$\alpha_3 = (1 - \mu_3) Q_1 + \varphi,$$

причем значения величины μ_2 и μ_3 берутся из табл. 8.

14. Нахождение A_1 и A_2 из табл. 9 по вычисленным значениям α_2 и α_3 . A_1 берутся по α_2 , а A_2 по α_3 .

15. Вычисление поправки ΔS_1 по формуле:

$$\Delta S_1 = A_1 \frac{d_1}{f'} - A_2 \frac{d_2}{f'}$$

16. Вычисление поправки ΔS_{xp} по формуле:

$$\Delta S_{xp} = -\frac{d_1 \alpha_2}{v_2 f'} + \frac{d_2 \alpha_3 (1 - \alpha_3)}{v_3 f'},$$

причем v_2 и v_3 следует взять из табл. 6 с точностью до $1 \cdot 10^{-3}$.

Таблица 8

Марка стёкла	n	$\mu = \frac{1}{n}$	$\frac{2}{n}$	$\frac{2}{n-1}$	$\frac{3}{n-1}$	$\frac{n}{(n-1)^2}$	$\frac{n}{n-1}$
К8	1,5163	0,65950	1,31900	3,87372	5,81057	5,68828	—
ТК2	1,5724	0,63597	1,27194	3,49406	5,24109	4,79914	—
Ф1	1,6128	0,62004	1,24008	3,26371	4,89556	4,29480	2,63185
Ф4	1,6242	0,61569	1,23137	3,20410	4,80615	4,16861	2,60205
ТФ1	1,6475	0,60698	1,21396	3,08880	4,63320	3,92958	2,54440

Таблица 9

α_2	n_2		α_3	n_3		
	1,5163	1,5724		1,6128	1,6242	1,6475
0,30	0,050	0,04	0,30	0,83	0,81	0,78
0,32	0,060	0,05	0,32	0,82	0,80	0,77
0,34	0,080	0,06	0,34	0,81	0,79	0,76
0,36	0,095	0,08	0,36	0,79	0,78	0,75
0,38	0,120	0,10	0,38	0,77	0,76	0,73
0,40	0,150	0,12	0,40	0,75	0,73	0,71
0,42	0,180	0,15	0,42	0,72	0,71	0,68
0,44	0,210	0,18	0,44	0,69	0,68	0,65
0,46	0,250	0,21	0,46	0,66	0,65	0,63
0,48	0,300	0,25	0,48	0,63	0,62	0,60
0,50	0,350	0,30	0,50	0,60	0,59	0,56
0,52	0,420	0,35	0,52	0,56	0,55	0,53
0,54	0,480	0,41	0,54	0,53	0,52	0,50
0,56	0,560	0,47	0,56	0,49	0,48	0,46
0,58	0,640	0,54	0,58	0,45	0,45	0,43
0,60	0,740	0,62	0,60	0,42	0,41	0,39
0,62	0,840	0,71	0,62	0,38	0,38	0,36
0,64	0,950	0,80	0,64	0,34	0,34	0,33
0,66	1,080	0,91	0,66	0,31	0,31	0,30
0,68	1,220	1,03	0,68	0,28	0,27	0,26
0,70	1,370	1,15	0,70	0,25	0,24	0,23
0,72	1,530	1,29	0,72	0,21	0,21	0,21
0,74	1,710	1,44	0,74	0,19	0,18	0,18
0,76	1,900	1,60	0,76	0,16	0,16	0,15
0,78	2,100	1,78	0,78	0,13	0,13	0,13
0,80	2,330	1,97	0,80	0,11	0,11	0,11

17. *Определение P по формуле:*

$$P = S_1 - \Delta S_1.$$

18. *Определение c по формуле:*

$$c = S_{xp} - \Delta S_{xp}.$$

19. *Нахождение φ из табл. 10.*

Таблица 10

Марка стекла		Вторая линза		
		$\Phi 1$ $\nu_3 = 36,938$	$\Phi 4$ $\nu_3 = 35,915$	$T\Phi 1$ $\nu = 33,865$
Первая линза	К8	2,362	2,2762	2,1217
	ТК2	2,799	2,6662	2,4346

20. *Вычисление φ_1 по формуле:*

$$\varphi_1 = \varphi (1 + \nu_3 c),$$

где ν_3 берется из табл. 10.

21. *Вычисление побочных величин:*

$$\begin{aligned} \varphi_1^2 & \quad (1 - \varphi_1)^2 \\ \varphi_1^3 & \quad (1 - \varphi_1)^3. \end{aligned}$$

22. *Вычисление a с помощью табл. 8 по формуле:*

$$a = 1 + \frac{2\varphi_1}{n_2} + \frac{2(1 - \varphi_1)}{n_3}.$$

23. *Вычисление b с помощью табл. 8 по формуле:*

$$b = \frac{3}{n_2 - 1} \varphi_1^2 - \frac{3}{n_3 - 1} (1 - \varphi_1)^2 - 2(1 - \varphi_1).$$

24. *Вычисление e с помощью табл. 8 по формуле:*

$$e = \frac{n_2 \varphi_1^3}{(n_2 - 1)^2} + \frac{n_3 (1 - \varphi_1)^3}{(n_3 - 1)^2} + \frac{n_3}{n_3 - 1} (1 - \varphi_1)^2.$$

25. *Вычисление P_{mi} по формуле:*

$$P_{min} = e - \frac{b^2}{4a}$$

26. Вычисление Q_k по формуле:

$$Q_k = -\frac{b}{2a}$$

27. Вычисление Q по формуле:

$$Q = Q_k + \sqrt{\frac{P - P_{\min}}{a}}$$

28. Вычисление α_2 и α_3 по формулам:

$$\alpha_2 = (1 - \mu_2)Q + \varphi_1;$$

$$\alpha_3 = (1 - \mu_3)Q + \varphi_1.$$

29. Вычисление высот для расчета радиусов:

$$h_1 = f',$$

$$h_2 = f' - \alpha_2 d_1,$$

$$h_3 = h_2 - \alpha_3 d_2.$$

30. 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. 29 и 30, удобно вести по схеме 1 просчета радиусов.

31. Вычисление нулевых лучей D , C и F производится по схеме 2, причем берутся соответственно показатели преломления D , C и F из табл. 11.

32. Вычисление крайних лучей D , C и F производится по схеме 3 при $h_1 = h_{кр}$ и $h_1 = h_3$, причем показатели преломления берутся соответственно лучам D , C и F из табл. 11.

33. Составление таблицы аберраций.

34. Вычерчивание графика аберраций, например, по образцу рис. 64.

35. Установление полного диаметра объектива. Полный диаметр линзы устанавливается в зависимости от способа крепления линз в оправе. Рекомендуется установить полный диаметр линзы по табл. 12, причем полученный из таблицы диаметр следует увеличить до ближайшего нормального диаметра по ГОСТу (от 3 до 13 мм через полмиллиметра, 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

ВЫЧИСЛЕНИЕ РАДИУСОВ

Дано:	$\alpha_1=0$		$n_1=1$	$h_1=f'$
	α_2	d_1	n_2	
	α_3	d_2	n_3	
	$\alpha_4=1$		$n_4=1$	

$\alpha_1=0$	$\alpha_1 n_1=0$			$h_1=f'$		$n_1=1$
α_2	$\alpha_2 n_2$	$\alpha_2 n_2 - \alpha_1 n_1 = \alpha_2 n_2$	$\alpha_2 d_1$	$h_2=f' - \alpha_2 d_1$	r_1	
α_3	$\alpha_3 n_3$	$\alpha_3 n_3 - \alpha_2 n_2$	$\alpha_3 d_2$	$h_3=h_2 - \alpha_3 d_2$	d_1	n_2
$\alpha_4=1$	$\alpha_4 n_4=1$	$\alpha_4 n_4 - \alpha_3 n_3 = 1 - \alpha_3 n_3$			r_2	
					d_2	n_3
					r_3	
	$\lg(n_2 - n_1)$	$\lg(n_3 - n_2)$		$\lg(n_4 - n_3)$		$n_4=1$
	$\lg h_1$	$\lg h_2$		$\lg h_3$		
	$\frac{\text{clg}(\alpha_2 n_2 - \alpha_1 n_1)}{\lg r_1}$	$\frac{\text{clg}(\alpha_3 n_3 - \alpha_2 n_2)}{\lg r_2}$		$\frac{\text{clg}(\alpha_4 n_4 - \alpha_3 n_3)}{\lg r_3}$		

ВЫЧИСЛЕНИЕ НУЛЕВОГО ЛУЧА

Дано:	r_1	$n_1 = 1$
	d_1	n_2
	r_2	n_3
	d_2	$n_4 = 1$

Примечание: предмет находится в бесконечности.

	$\lg h_2$	$\lg h_3$	
	$\lg (n_3 - n_2)$	$\lg (n_4 - n_3)$	
	$\frac{\text{clg } r_2}{\lg N_2}$	$\frac{\text{clg } r_3}{\lg N_3}$	
	N_2	N_3	
$\frac{n_2 - n_1}{\gamma_2}$	$\frac{\gamma_2}{\gamma_3}$	$\frac{\gamma_3}{\gamma_4}$	
$\lg \gamma_2$	$\lg \gamma_3$		
$\lg d_1$	$\lg d_2$	$\lg h_1$	
$\frac{\text{clg } n_2}{\lg N'_1}$	$\frac{\text{clg } n_3}{\lg N'_2}$	$\frac{\text{clg } \gamma_4}{\lg f'_0}$	$f'_0 =$
$-N'_1$	$-N'_2$	$\lg h_3$	
$\frac{h_1 = r_1}{n_2}$	$\frac{h_2}{h_3}$	$\frac{\text{clg } \gamma_4}{\lg s'_0}$	$s' =$

ВЫЧИСЛЕНИЕ КРАЙНЕГО ЛУЧА

Дано:

$$n_1=1$$

 r_1
 d_1
 n_2
 r_2
 d_2
 n_3
 r_3

$n_4=1$

$\alpha_1=0;$

$s_1 = -\infty;$

$h_1=$

	K_2	K_3	r_3
	$\frac{q_1'}{q_2}$	$\frac{q_2'}{q_3}$	$\frac{-q_3'}{s_3'}$
	$\frac{\lg q_2}{\lg q_3}$	$\frac{\lg q_3}{\lg q_3}$	$\frac{-s_0'}{\Delta s'}$
$\frac{\lg h_1 - \text{clg } r_1}{\lg \sin i_1}$	$\frac{\lg \sin \alpha_2}{\text{clg } r_2}$	$\frac{\lg \sin \alpha_3}{\text{clg } r_3}$	
$\frac{\lg (n_1 : n_2)}{\lg \sin i_1'}$	$\frac{\lg \sin i_2}{\lg (n_2 : n_3)}$	$\frac{\lg \sin i_3}{\lg (n_3 : n_4)}$	
$\frac{\lg r_1}{\text{clg } \sin \alpha_3}$	$\frac{\lg r_2}{\text{clg } \sin \alpha_3}$	$\frac{\lg r_3}{\text{clg } \sin \alpha_4}$	
$\frac{\lg q_1'}{-i_1}$	$\frac{\lg q_2'}{-i_2}$	$\frac{\lg q_3'}{-i_3}$	
$\frac{i_1'}{\alpha_2}$	$\frac{i_2'}{\alpha_3}$	$\frac{i_3'}{\alpha_4}$	
	$\frac{\alpha_2}{\alpha_3}$	$\frac{\alpha_3}{\alpha_4}$	
			$\frac{\lg h_1}{\text{clg } \sin \alpha_4}$
			$\frac{\lg f_3'}{-f_0'}$
			$\Delta f'$

$$K_2 = r_2 - r_1 + d_1$$

$$K_3 = r_3 - r_2 + d_2$$

Таблица 11

Марка стекла	n_C	n_D	n_F	n_G
К8	1,51390	1,5163	1,52195	1,52645
ТК2	1,56947	1,5724	1,57943	1,58510
Ф1	1,60807	1,6128	1,62466	1,63473
Ф4	1,61925	1,6242	1,63663	1,64721
ТФ1	1,64208	1,6475	1,66120	1,67293

Таблица 12

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

допуски, на положительную L_4 , а на отрицательную — X_3 , кроме особых случаев (например, C_3).

Вычисление рекомендуется производить на арифмометре и с помощью шестизначных таблиц логарифмов.

Численные данные таблиц § 52 позволяют производить вычисление объективов, составленных из пар стекол: К8—ТФ1, К8—Ф1, К8—Ф4, ТК2—Ф1, ТК2—Ф4 и ТК2—ТФ1.

Глава седьмая

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПРИБОРОВ

§ 53. Глаз

Глаз является природным оптическим инструментом и имеет сложное устройство (рис. 75). 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 со-

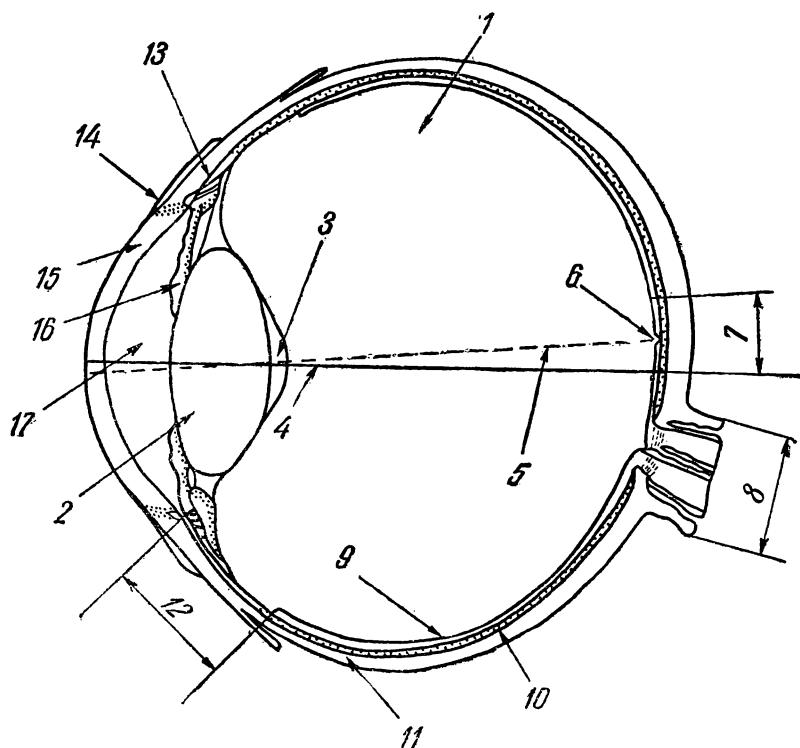


Рис. 75. Разрез глаза человека: 1—стекловидное тело; 2—хрусталик; 3—захрусталиковое пространство; 4—оптическая ось; 5—зрительная ось; 6—центральная ямка; 7—желтое пятно; 8—зрительный нерв; 9—рети-на; 10—сосудистая оболочка; 11—склера; 12—ресничное тело; 13—ресничная мышца; 14—конъюнктивa; 15—роговица; 16—радужная оболочка; 17—передняя камера

впадает 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 совпадает с оптической осью, а составляет с ней так называемый *угол альфа*, примерно равный 5° . При наблюдении тех или иных предметов глаз чело-

века 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 является: 1) аккомодация, 2) адаптация, 3) световая чувствительность, 4) спектральная чувствительность, 5) острота зрения, 6) поле зрения, 7) бинокулярное зрение, 8) стереоскопическое зрение.

1. Аккомодация. Аккомодацией называется способность глаза приспосабливаться 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 выраженная в диоптриях — *силу аккомодации*. Сила аккомодации изменяется с возрастом, так, например, в возрасте 20 лет она составляет 10 диоптрий, а в 50 лет — 2,5 диоптрии. За расстояние наилучшего зрения принимают 250 мм.

2. Адаптация. Адаптацией называется способность глаза приспосабливаться к различным условиям освещенности. Различают *световую* и *темновую адаптации* 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 пе-

реходе 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.

3. Световая чувствительность. Чувствительность глаза характеризуется наименьшим количеством световой энергии, могущей вызвать световое раздражение — *темновым порогом раздражения*. Темновой порог раздражения иногда называют *абсолютным порогом зрения*. Для получения светового раздражения необходима мощность световой энергии, проникающей в глаз $2,5 \cdot 10^{-9}$ — $4,2 \cdot 10^{-9}$ эрг/сек.

4. Спектральная чувствительность. Обычно глаз воспринимает цвета в диапазоне длин волн 400—760 мкм. 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 чувствительности имеет место для длины волны 564 мкм.

5. Острота зрения. Остротой зрения, или разрешающей силой глаза, называется способность глаза различать две близкие точки раздельно 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 (проекция) за разрешающую 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.

6. Поле зрения. Поле зрения определяется пространством, наблюдаемым неподвижным глазом. Оно равно: книзу 70° , кверху 55° , к носу 60° и к виску 90° (125° по вертикали и 150° по горизонтали). Движение глаз позволяет увеличить угло-

вую величину просматриваемого пространства. Наибольшее отклонение зрительной оси в сторону достигает $45\text{—}50^\circ$

7. Бинокулярное зрение. В каждом глазу образуются отдельные изображения, которые в зрительном впечатлении сливаются в одно. Геометрическое место точек пространства, которые видны одиночными, называется *горонтером*. Поле зрения, видимое одновременно обоими глазами, называемое *бинокулярным*, составляет около 120° *Глазной базис* (расстояние между осями глаз) для различных людей колеблется в пределах от 58 до 72 мм, составляя в среднем 65 мм. При наблюдении близких предметов глаза поворачиваются, а их оси составляют некоторый угол, называемый *углом конвергенции*. Максимальный угол конвергенции 32°

8. Стереоскопическое зрение. 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.

Глазной базис b определяет *базис стереоскопического зрения* как расстояние между главными точками глаз. Угол, образованный визирными осями глаз на наблюдаемую точку, называется *стереоскопическим параллаксом* ϵ .

$$\epsilon = \frac{b}{p}, \quad (53,1)$$

где p — дистанция до предмета.

Способность замечать малые разности стереоскопических параллаксов называется *остротой стереоскопического зрения* η . 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. 76, 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. 76, б). Без линзы или с помощью

объема аккомодации близорукий глаз может рассматривать предметы вблизи.

Оптическая сила дальнорядного глаза ослаблена в сравнении с нормальным. Поэтому (рис. 76, б) точка заднего фокуса расположена за сетчаткой. При приближении предметов к глазу точка изображения передвинется еще дальше от сетчатки. Следовательно, дальнорядный глаз всегда работает с напряжением аккомодации. Для исправления этого недостатка необходима положительная линза (рис. 76, а).

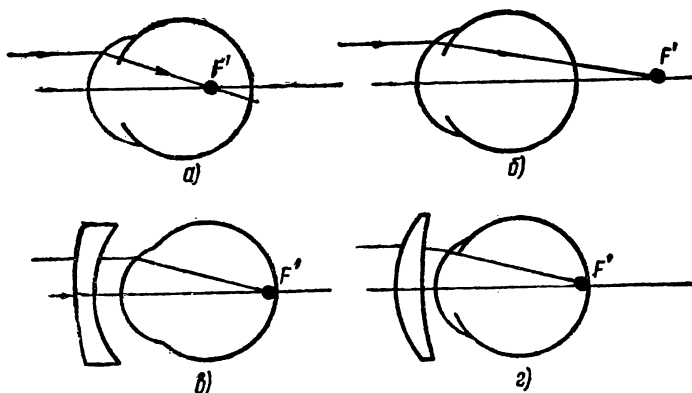


Рис. 76. Недостатки зрения

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.

§ 54. Оптические детали

Во многих оптических приборах различных конструкций применяются однотипные оптические детали в виде плоскопараллельных пластин, отражающих призм, объективов, коллективов и окуляров. Эти детали и узлы имеют свои 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.

$$d - d_0 = d - \frac{d}{n} = d \left(1 - \frac{1}{n} \right) = d \frac{n-1}{n} \quad (54,1)$$

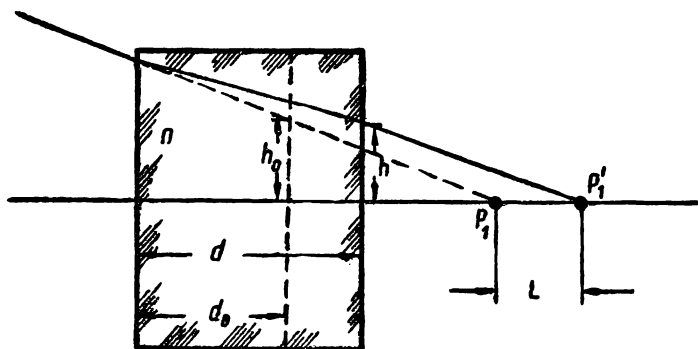


Рис. 77. Оптическое редуцирование

Редуцирование заключается в приведении оптической среды пластины к воздуху путем деления ее толщины на показатель преломления. Найдем разность действительной толщины и редуцированной.

Это уравнение тождественно уравнению (16,2). Следовательно, в редуцированной пластине точка P_1' (рис. 77) будет находиться 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

$$d - d_0 = L, \quad \text{то} \quad h_0 = h.$$

При переходе от редуцированных пластин к действительным необходимо учитывать удлинение хода луча на величину смещения L .

Редуцирование пластин упрощает расчет их диаметра. Если диаметр зрачка входа (или выхода) D , расстояние от зрачка до пластины p , толщина пластины d , показатель пре-

ломления n , а угол луча, выходящего из края зрачка и определяющего наибольший световой диаметр пластины с оптической осью, ω , то, применяя формулу высот (11, 17), получим:

$$D_{\text{св}} = D + 2 \operatorname{tg} \omega \left(p + \frac{d}{n} \right) \quad (54,2)$$

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, также учитывается на аберрации при вычислении микрообъектива большого увеличения. 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 (рис. 78).

Габариты зеркала легко найти из геометрических соотношений с учетом смещения луча z :

$$z = 2d \operatorname{tg} i'. \quad (54,3)$$

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.

Отражающие призмы. Если от одной или нескольких граней призмы происходит отражение пучков лучей, то такая призма называется *отражающей*.

Грань призмы, от которой внутри призмы происходит отражение пучков лучей, серебрится в тех случаях, когда на этой поверхности раздела двух оптических сред «стекло—воздух» не происходит явления полного внутреннего отражения. Отражающие призмы имеют значительное распространение в оптических приборах. Их основным назначением является: 1) изменение направления оптической оси в каком-либо месте прибора, 2) оборачивание изображения в заданном направлении.

Преломляющая призма может выполнить первое только в том случае, если изменение направления оптической оси ма-

ло ($3-4^\circ$), так как в других случаях резкость изображения настолько ухудшается вследствие дисперсии, что пользование прибором становится практически невозможным. Кроме того, преломляющая призма вносит несимметричные аберрации относительно оптической оси, которые невозможно компенсиро-

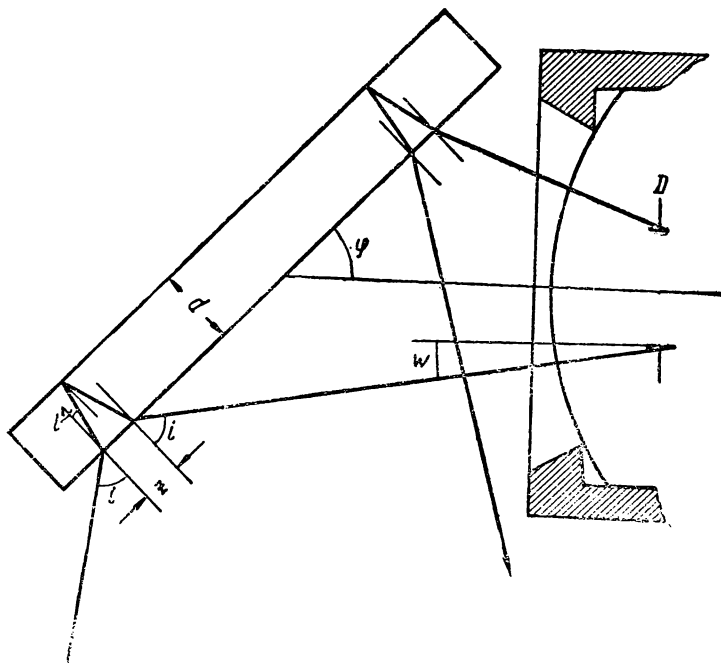


Рис. 78. Зеркало с внутренним серебрением

вать линзовой оптикой. Отражающая 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 аберрации, равные аберрациям плоскопараллельной пластины. Но если призма расположена в параллельном пучке лучей, ее аберрации не оказывают практического действия на качество изображения всего прибора. Например, если призма распо-

ложена 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

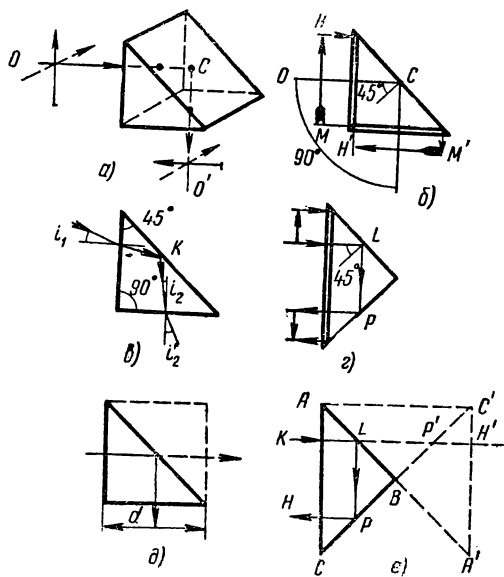


Рис. 79. Прямоугольная призма

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. 79). Как видно из рис. 79, а и 79, б, призма поворачивает оптическую ось на 90° и оборачивает изображение сверху вниз, т. е. в одном направлении. Развертка такой призмы показана на рис. 79, 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 диа-

метру отверстия пучка лучей D назовем коэффициентом призмы k :

$$k = \frac{d}{D}. \quad (54,4)$$

В прямоугольной призме катет определяет величину такого отверстия, следовательно, коэффициент прямоугольной призмы равен единице.

Если лучи входят в призму со стороны гипотенузной поверхности (рис. 79, *г*), то пучок лучей изменяет направление на 180° и смещается. Изображение не оборачивается, так как первая отражающая грань повернет изображение, как и прямоугольная призма, сверху вниз, а вторая отражающая грань — снизу вверх. Развертка этой призмы показана на рис. 79, *е*. Длина хода луча $d=2D$, т. е. $k=2$.

Если на прямоугольную призму будет падать луч под углом i (рис. 79, *в*), то по выходе из призмы луч не будет образовывать угол в 90° с лучом вошедшим. Конструкции некоторых призм, из числа наиболее распространенных, показаны на рис. 80.

Прямоугольную призму можно превратить в призму прямого зрения (призма Дове). 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:

$$d = \frac{2nD}{\sqrt{2n^2 - 1} - 1} \quad (54,5)$$

Основание призмы при этом равно:

$$e = 2D \frac{\sqrt{2n^2 - 1}}{\sqrt{2n^2 - 1} - 1} \quad (54,6)$$

Для призмы из стекла К8 $d=3,3812 D$ и $e=4,2299 D$, а для призмы из стекла БК10 $d=3,2001 D$ и $e = 4,0398 D$.

Призмой Дове пользуются для того, чтобы вращать изображение (или компенсировать вращение изображения) в оптических приборах. Оптический механизм вращения показан на рис. 81. 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 несим-

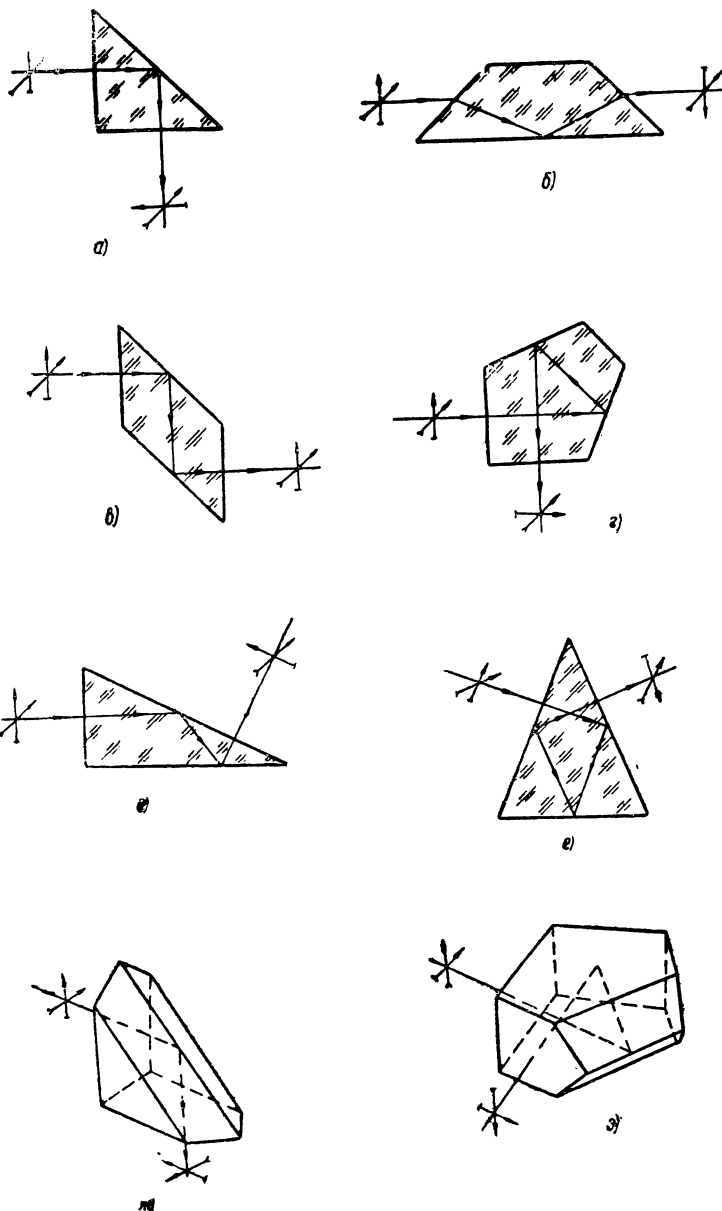


Рис. 80. Призмы: *a*—прямоугольная призма; *б*—призма Дове; *в*—призма-ромб; *г*—пентапризма; *д*—полупентапризма; *е*—призма Шмидта; *ж*—прямоугольная призма с крышей; *з*—пентапризма с крышей

метричны, а по абсолютной величине значительны (45° и более), что вызывает астигматизм, поэтому ее применяют только в параллельных пучках лучей.

Разновидностью семейства прямоугольных призм является призма-ромб, как бы состоящая из двух прямоугольных призм. Она не оборачивает изображения. Ход луча равен $d = 2D$, $K = 2$. Призма смещает лучи, оставляя направление входящего и выходящего лучей неизменным. Она находит себе частое применение в биноклярных приборах для изменения глазного базиса. Верхняя ось может быть неподвижной, а нижняя — качаться.

Пентапризма поворачивает луч на 90° и не оборачивает изображения. Длина хода луча в ней $d = 3,4142 D$, $k = 3,4142$. Свойством этой призмы является то, что луч, вышедший из призмы, с вошедшим всегда сохраняет угол в 90° . Этим обстоятельством пользуются в тех случаях, когда в измерительных целях необходимо строго сохранять между лучами угол в 90° , например в дальномерах.

Половина пентапризмы позволяет образовать призму, называемую полупентапризмой. Она изменяет направление лучей на 45° и не оборачивает изображения. Длина хода луча в призме $d = 1,7071D$, или $k = 1,7071$.

Призма нашла себе применение как окулярная призма, изменяющая направление оптической оси прибора на 45° и позволяющая получить удобное положение голове наблюдателя.

Особое место среди призм занимают крышеобразные призмы (дах-призмы). Любую отражающую призму можно превратить в крышеобразную, если одну из отражающих граней заменить двумя, составляющими между собой угол в 90° . Назначение крышеобразной призмы — повернуть изображение слева направо. Поэтому в оптическом приборе оправдывается появление только одной крышеобразной призмы.

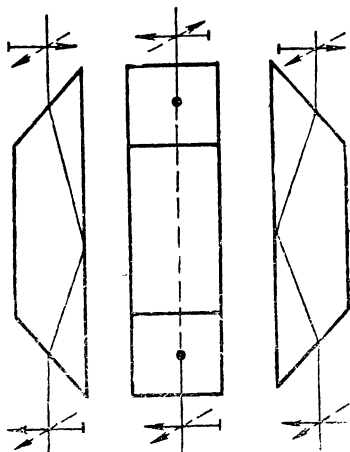


Рис. 81. Вращение изображения при вращении призмы прямого зрения

Прямоугольная призма с крышей в главном сечении такая же, как обычная прямоугольная. Призма с крышей изменяет направление оптической оси на 90° и оборачивает изображение и сверху вниз и справа налево. Длина хода ее луча $d=1,732D$, 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 часто находят себе применение комбинации различных призм, называемые призмными системами (рис. 82). В современных призмных биноклях применяется система Малафеева, изобретенная им в 1827 г. и широко 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. 83) находится перед отверстием оптической системы на расстоянии b . Диаметр отверстия D . В отверстие поступает параллельный пучок лучей. Призма развернута в плоскопараллельную пластинку и редуцирована.

Из рис. 83 следует:

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{D_k - D}{2 \left(\frac{d}{n} + b \right)}$$

Но $d=kD_k$, где k — коэффициент призмы, тогда:

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{D_k - D}{2 \left(\frac{kD_k}{n} + b \right)} \quad (54,7)$$

Например, прямоугольная призма с крышей, с отверстием $D_k=70$ мм из стекла К8 с $n=1,5163$, расположенная перед

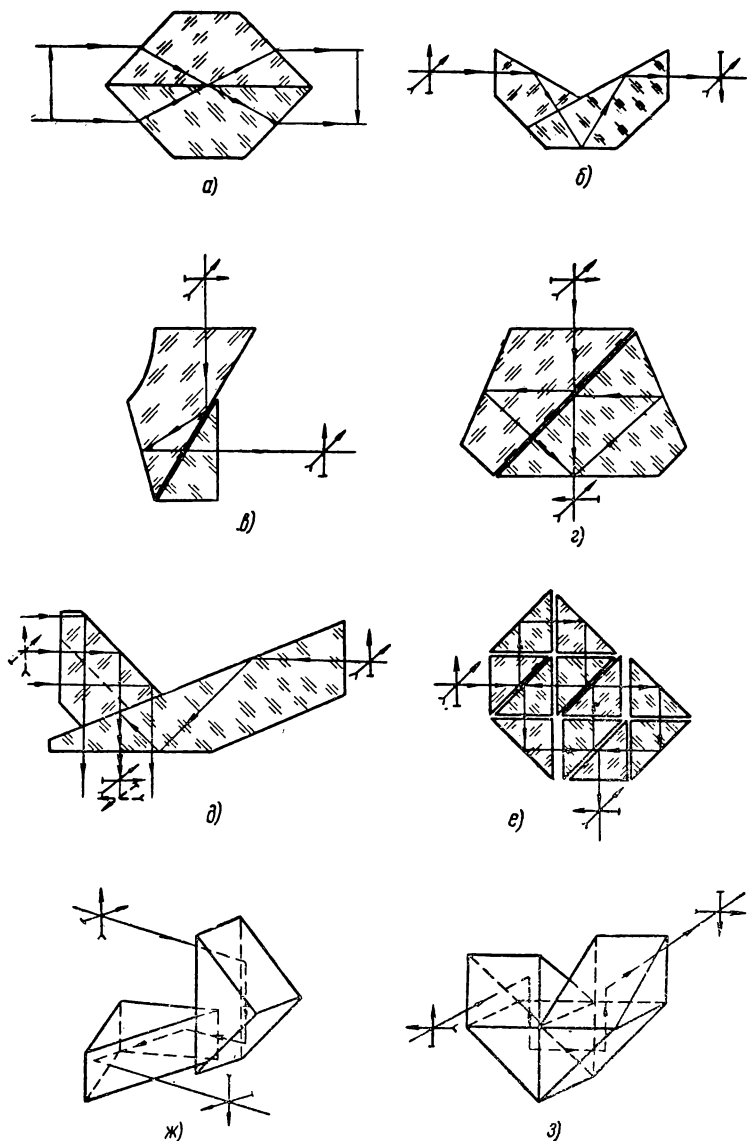


Рис. 82. Призменные системы: *a* — призма куб; *б* — призма Аббе; *в* — призма башмачная с клином; *г* — призма Пехана; *д* — разделяющая призма дальномера; *е* — система прямоугольных призм; *ж* — система Порро I рода; *з* — система Порро II рода

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. 83, 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 вы-

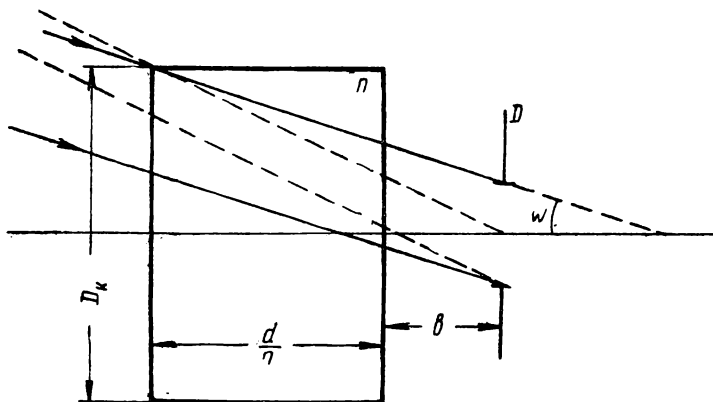


Рис. 83. Призма ограничивает поле зрения оптической системы

бирают отверстие D , необходимое для работы, и вычисляют возможное поле зрения, исходя из полного заполнения светового отверстия лучами, идущими под углом ω .

Рассмотрим влияние призмы на поле зрения в расходящихся пучках лучей (рис. 84). Угловое поле зрения таких систем определяется лучом, показанным пунктиром, направляющимся из края предмета T в центр светового отверстия P .

Из рис. 84 следует:

$$\operatorname{tg} \omega = -\frac{l}{p}.$$

Кроме того,

$$\operatorname{tg} \beta' = -\frac{2l - D}{2p} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \beta' = \frac{D_k - D}{2\left(\frac{kD_k}{n} + b\right)}$$

Находим l :

$$l = \frac{D}{2} - \frac{p(D_k - D)}{2\left(\frac{kD_k}{n} + b\right)},$$

Подставив последнее выражение в первое, получим:

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{D_k - D}{2 \left(\frac{kD_k}{n} + b \right)} - \frac{D}{2\rho} \quad (54,8)$$

Для того же численного примера, при $\rho = -600$, имеем $\omega = 14^\circ 15'$.

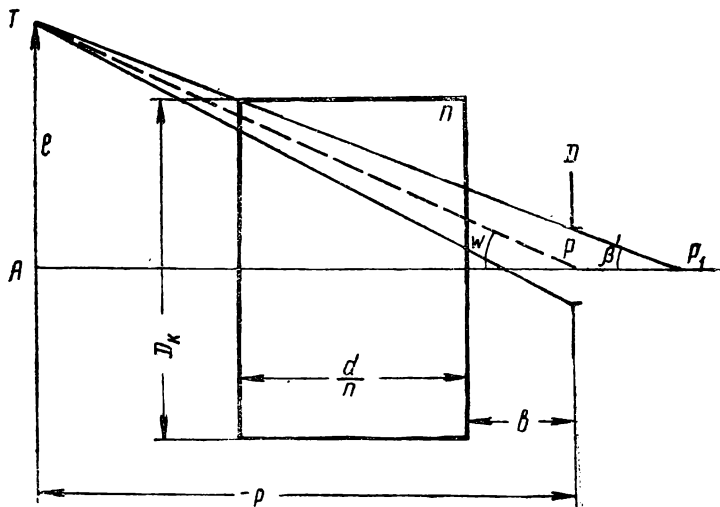


Рис. 84. Влияние призмы на поле зрения при положении предмета на конечном расстоянии от оптической системы

Призмы отрицательно влияют на поле зрения, уменьшая его с увеличением k .

Объективом называется линза или система линз оптического прибора, обращенная к предмету. Объектив характеризуется фокусным расстоянием f' , относительным отверстием и полем зрения 2ω . В большинстве случаев объектив образует действительное изображение предмета.

Наиболее часто в различных оптических приборах применяется ахроматический двухлинзовый склеенный объектив (см. рис. 72). В некоторых случаях в геодезических и астрономических инструментах он применяется не склеенным.

Угловое поле зрения двухлинзовых объективов достигает $8-12^\circ$. Поэтому в тех случаях, когда необходимы более ши-

роугольные объективы, применяются конструкции фотографических многолинзовых объективов.

Если перед широкоугольным объективом необходимо разместить призмы, то в целях достижения их наименьшего размера необходимо призмы разместить в зрачке входа, а для этого зрачок входа должен быть перед объективом (рис. 83, $b = -\frac{d}{2n}$). Так как обычные или фотографические объекти-

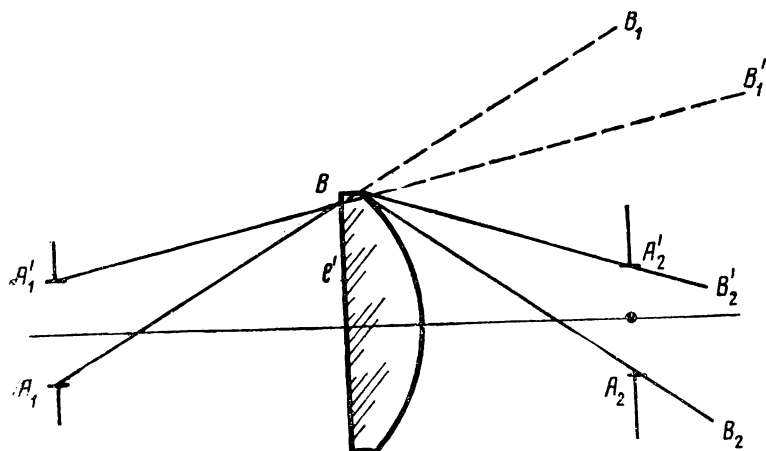


Рис. 85. Коллектив

вы, как правило, имеют зрачок входа 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 зрачок выхода совпал со зрачком входа объектива.

Коллективом называется линза, устанавливаемая в плоскости действительного изображения или вблизи ее, назначение которой заключается в том, чтобы отклонить к оптической оси наклонные пучки лучей.

На рис. 85 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 лучи преломляет и направляет

в отверстие $A_2A'_2$ по направлениям A_2B_2 и $A'_2B'_2$. Покажем, что линза, расположенная в плоскости изображения, не влияет на фокусное расстояние эквивалентной системы.

На рис. 86 показаны две бесконечно тонких системы Φ_1 и Φ_2 , где Φ_2 есть оптическая сила коллектива, установленного в фокальной плоскости первой системы Φ_1 .

По формуле оптической силы двух систем (28, 5) имеем:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - f' \Phi_1 \Phi_2,$$

где $\Phi_2 = \frac{1}{f'}$, тогда $\Phi = \Phi_1$. Аналогичным образом можно рас-

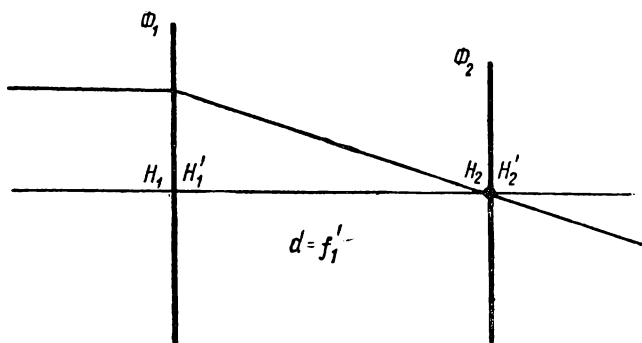


Рис. 86. Коллектив не влияет на фокусное расстояние эквивалентной системы

смотреть и взаимодействие коллектива и второй системы $A_2A'_2$ (рис. 85).

Коллектив не влияет на ход пучка лучей, идущего из точки на оси оптической системы, а влияет на ход наклонных лучей.

Найдем оптическую силу коллектива Φ_2 , расположенного в фокальной плоскости между двумя оптическими системами с оптическими силами Φ_1 и Φ_2 (рис. 87). 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 главном фокусе первой оптической системы и в переднем главном фокусе второй.

Вспользуемся формулами углов и высот (27,3) и (11,17).
 Примем $h=1$, тогда $\alpha_1 = \frac{1}{t}$, далее

$$\alpha_2 = \alpha_1 + h_1 \Phi_1 = \frac{1}{t} + \Phi_1$$

и $h_2 = h_1 - \alpha_2 d_1$.

Подставим в последнее выражение только что найденное
 тогда получим, помня, что $d_1 = \frac{1}{\Phi_1}$,

$$h_2 = 1 - \left(\frac{1}{t} + \Phi_1 \right) \frac{1}{\Phi_1} = - \frac{1}{t \Phi_1}.$$

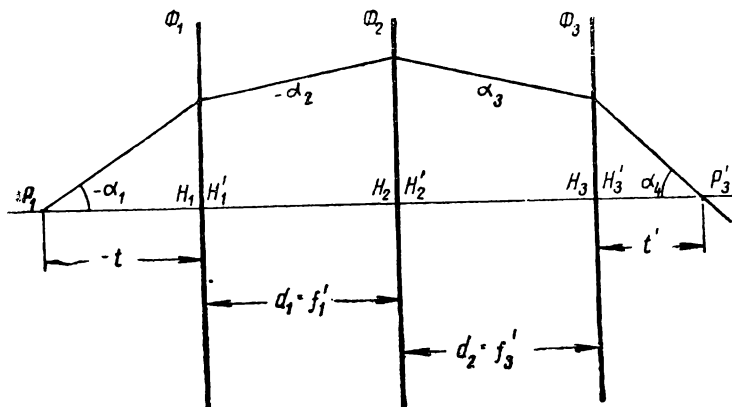


Рис. 87. К выводу формулы коллектива

Аналогично найдем α_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 α_3 и h_3 и преобразований получим:

$$\Phi_2 = \Phi_1(1 + t\Phi_1) + \Phi_3(1 - t'\Phi_3). \quad (54,9)$$

Правильной работе коллектива мешает сферическая абберация. При отсутствии сферической абберации средние лучи P_1K_1 и P_1K_2 (рис. 88) пересекали 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 оптическую ось в центре отверстия P_1'

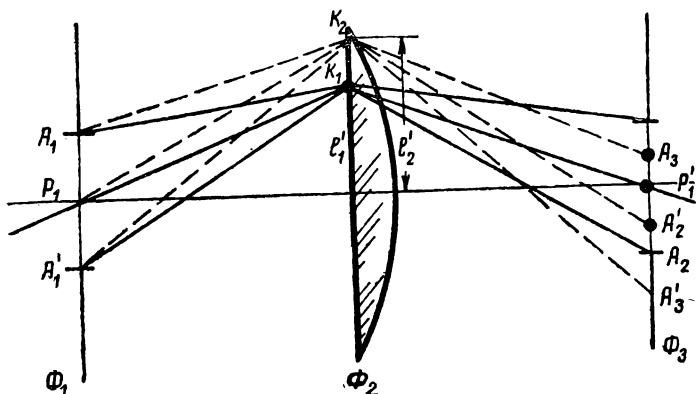


Рис. 88. Сферическая абберация коллектива

Вследствие сферической абберации 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 абберация коллектива влияет на распределение освещенности по полю изображения.

Если оптическая сила коллектива будет подобрана так, чтобы луч из точки K_2 проходил через точку P_1' , то средний луч пучка из точки K_1 будет пересекать оптическую ось правее точки P_1' и теперь будут задерживаться лучи в верхней части пучка, выходящего из точки K_1 .

Покажем действие сферической абберации коллектива в виде плоско-выпуклой линзы с данными:

$$\begin{array}{ll} r_1 = \infty & n_1 = 1 \\ d_1 = 7 & n_2 = 1,6475 \\ r_2 = -21 & n_3 = 1. \end{array}$$

Фокусное расстояние коллектива 32,4 мм. Лучи выходят из точки P_1 на расстоянии 35 мм перед коллективом.

Высота луча на коллективе l' , мм	0	8	11	12,65
Положение изображения после коллектива, мм	186,7	129,7	94,6	75,3

Сферическая aberrация коллектива для величины изображения на коллективе в 12,65 мм достигает огромной величины в $\delta s' = 111,4$ мм!

Для того чтобы устранить сферическую aberrацию, нужно применять асферический коллектив, кривизна которого должна удовлетворять условию безабберационного изображения точки.

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 $\bar{\Gamma} = \frac{250}{f'}$;
3. Полем зрения $2\omega'$;
4. Диаметр зрачка выхода D' ;
5. Положением зрачка выхода t' ;
6. Расстоянием от рассматриваемого предмета (изображения) до первой поверхности s_F .

Принципиальная оптическая схема окуляра показана на рис. 89. Поверхности окуляра показаны пунктиром. Предмет расположен в плоскости изображений (передняя фокальная плоскость окуляра). Глаз наблюдателя устанавливается в центре зрачка выхода. Условия наблюдения требуют достаточного удаления зрачка выхода от окуляра, чтобы все пучки лучей попали в зрачок глаза. Расстояние s_F имеет значе-

ние в случае расположения сетки 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. Увеличению поля зрения окуляров препятствуют абер-

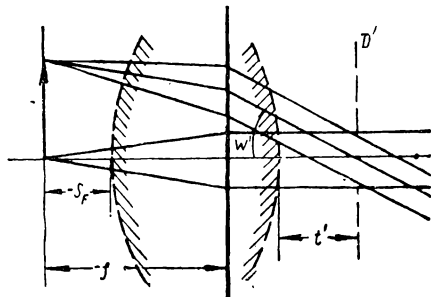


Рис. 89. Окуляр

рации окуляра, в первую очередь астигматизм и кривизна поля. Если найти линейные аберрации, соответствующие одинаковым аберрациям в диоптриях при различных фокусных расстояниях, то окажется, например, что для $L_m = 3,6$ и $f' = 10$ мм имеем угол поля зрения $\omega' = 18^\circ$, а для $f' = 40-50$ мм угол поля зрения возможен $\omega' \cong 35^\circ$

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. 90.

Окуляр Гюйгенса. Линзы плоской стороной обращены к наблюдателю и плоскость изображения, образованная пре-

дыдущей 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. Вычис-

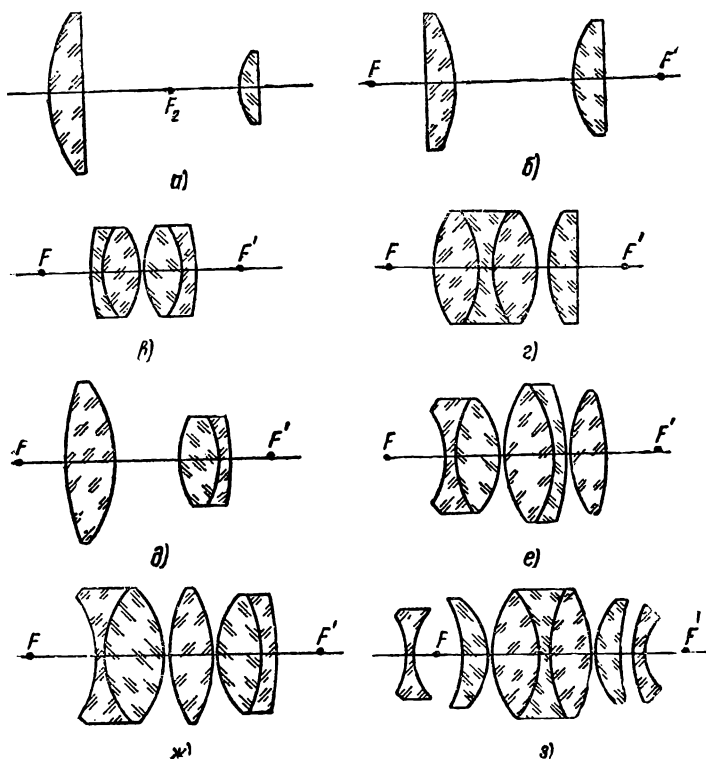


Рис. 90. Типы окуляров: *a* — окуляр Гюйгенса, $2\omega = 30^\circ$; *b* — окуляр Рамсдена, $2\omega = 30^\circ$; *c* — симметричный окуляр $2\omega = 40^\circ$; *d* — ортоскопический окуляр, $2\omega = 40^\circ$; *e* — окуляр Кельнера, $2\omega = 45^\circ$; *f* — окуляр с удаленным зрачком, $2\omega = 50^\circ$; *ж* — окуляр Эрфле, $2\omega = 60^\circ$; *з* — широкоугольный окуляр, $2\omega = 88^\circ$

ление конструктивных данных такого окуляра с фокусным расстоянием f' рекомендуется производить с соблюдением следующих условий.

1. Для окуляров с увеличением не свыше $5\times$

$$f'_1 = 3,85f'; \quad f'_2 = 0,57f'; \quad d = 0,92f'; \quad \text{стекло К9.}$$

2. Для окуляров с увеличением не свыше $8\times$

$$f'_1 = 1,25f'; \quad f'_2 = 0,7f'; \quad d = 1,05f'; \quad \text{стекло } \Phi I$$

Для окуляров с увеличением не свыше $15\times$

$$f' = 1,6f'; \quad f'_2 = 0,85f'. \quad d = 1,15f'.$$

Стекла для окуляра $10\times$ ΦI и $K9$, а для $15\times$ — $T\Phi I$ и $K9$.

Окуляр Рамсдена. Одинаковые плоско-выпуклые линзы обращены выпуклыми сторонами друг к другу. Применяя формулу оптической силы (28,5), при $\Phi_1 = \Phi_2$ имеем:

$$\Phi = 2\Phi_1 - d\Phi_1^2.$$

Отсюда, используя решение с наибольшим f' получим:

$$\Phi_1 = \frac{1 - \sqrt{1 - d\Phi}}{d} \quad (54,9)$$

Найдем зависимости между d и f' , а также f'_1 и f' , исходя из условия:

$$d = 0,75f'. \quad (54,10)$$

Зависимость между d и f'_1 может быть выражена уравнением:

$$d = xf'_1.$$

Подставив это уравнение в формулу для Φ , получим:

$$\Phi = \Phi_1(2 - x).$$

Далее введем последнее уравнение в (54,10):

$$\frac{0,75}{\Phi_1(2 - x)} = xf'_1.$$

После подстановки получим: $x = 0,5$, тогда

$$d = 0,5f'_1. \quad (54,11)$$

$$f'_1 = 1,5f'. \quad (54,12)$$

Вершинное фокусное расстояние найдем, применяя формулу (28,6), 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 на расстоянии $\frac{d}{n}$, окончательно получим:

$$-s_F = s'_F = \frac{1 - \Phi_1 d}{\Phi_1 (2 - \Phi_1 d)} - \frac{d}{n}. \quad (54,13)$$

Для тонкой системы:

$$s'_F = 0,333f'_1. \quad (54,14)$$

Окуляр в приборе обычно имеет некоторое перемещение (фокусировку) вдоль оптической оси с целью приспособления к недостаткам глаз наблюдателя в пределах до ± 7 диоптрий (L_r). 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 (48,1), в которой под X'_m понимается линейное смещение x , а под L_m — число диоптрий L_r . Тогда формула фокусировки окуляром примет вид:

$$x = \frac{L_r f'^2}{1000} \quad (54,15)$$

Для близорукого глаза окуляр вдвигается, а для дальнозоркого выдвигается.

Пример 25. Определить конструктивные элементы окуляра типа Рамсдена с видимым увеличением $10\times$

Решение. Дано: $\bar{\Gamma} = 10$, отсюда $f' = \frac{250}{\bar{\Gamma}} = 25$ мм.

Применим формулу (54,12) и (54,11):

$$f'_1 = 1,5 f' = 1,5 \cdot 25 = 37,5 \text{ мм},$$

$$d_2 = 0,5 f'_1 = 0,5 \cdot 37,5 = 18,75 \text{ мм}.$$

Кривизну поверхностей найдем по формуле плоско-выпуклой линзы (30,4). 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:

$$r_1 = \infty$$

$$d_1 = 3 \quad \text{К8} \quad \text{Полный } \phi = 16,0$$

$$r_2 = -19,35$$

$$d_2 = 18,75$$

$$r_3 = 19,35$$

$$d_3 = 3 \quad \text{К8} \quad \text{Световой } \phi = 15,0.$$

$$r_4 = \infty.$$

§ 55. Телескопические системы

Оптические системы, предназначенные для наблюдения далеко 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 будет 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. 91. Объектив является зрачком входа. Он образует изображение величиной l' в передней фокальной плоскости окуляра. Зрачок выхода системы расположен за окуляром. Глаз наблюдателя, поме-

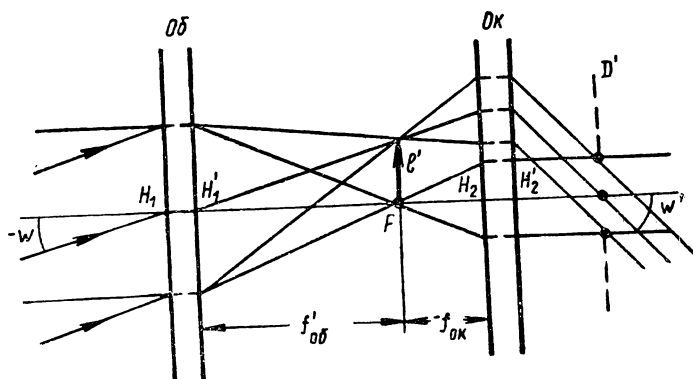


Рис. 91. Простая зрительная труба

щенный в зрачке выхода, сможет рассмотреть все изображение, так как через зрачок выхода проходят все пучки лучей.

Если в качестве окуляра применена отрицательная оптическая система, то такая система называется *системой Галилея*. Она имеет применение в театральные биноклях. Ход лучей в тонкой системе Галилея показан на рис. 92. Такая система дает прямое изображение, отличается малым полем зрения и имеет вследствие этого ограниченное применение.

Ее преимуществом является сокращение длины, что наглядно показано на рис. 93. При одинаковых фокусных расстояниях объектива и окуляра система Галилея короче системы Кеплера на два фокусных расстояния окуляра.

Главными оптическими характеристиками телескопической системы являются:

1. Видимое увеличение Γ .
2. Поле зрения 2ω .
3. Диаметр зрачка выхода D'

Величина изображения l' , образованного объективом, очевидно, равна (рис. 91):

$$l' = -f'_{об} \cdot \operatorname{tg} \omega,$$

а со стороны окуляра:

$$l' = -f_{ок} \operatorname{tg} \omega'.$$

Отсюда

$$\frac{\operatorname{tg} \omega'}{\operatorname{tg} \omega} = \frac{f'_{об}}{f_{ок}}$$

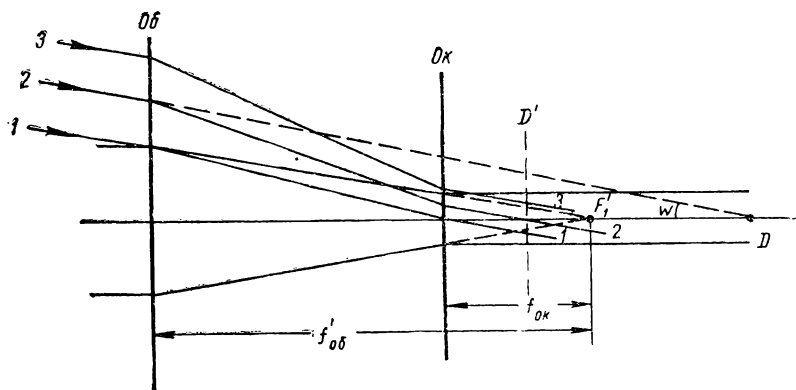


Рис. 92. Оптическая система театрального бинокля (система Галилея)

Но отношение тангенсов углов есть видимое увеличение. Тогда, переходя к $f'_{ок} = -f_{ок}$, получим:

$$\Gamma = -\frac{f'_{об}}{f_{ок}}. \quad (55,1)$$

Знак минус указывает на то, что изображение обратное. Из подобия треугольников, имеющих общую вершину, установим:

$$\Gamma = \frac{D}{D'} \quad (55,2)$$

Обычно на практике знак минус в формуле видимого увеличения опускается.

Видимым увеличением телескопической системы назы-

вается отношение диаметра зрачка входа к диаметру зрачка выхода.

Диаметр зрачка входа выбирается из условия разрешающей способности, формула (51,2), а диаметр зрачка выхода из условия видимого увеличения, уравнение (55,2). Поле зрения телескопической системы ограничивается полем зрения окуляра. Принимая за наибольшее угловое поле зрения окуляра $2\omega' = 100^\circ$, получим возможный угол поля зрения системы:

$$\operatorname{tg} \omega_{\max} = \frac{\operatorname{tg} 50^\circ}{\Gamma}. \quad (55,3)$$

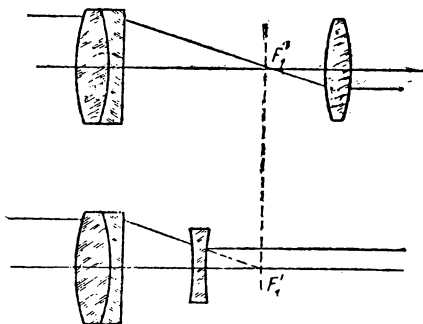


Рис. 93. Сравнение длин зрительных труб

Длина простой зрительной трубы равна:

$$L = f'_{об} + f'_{ок}. \quad (55,4)$$

Если оптическая система должна быть длинной (цистоскоп, перископ, смотровые трубки и т. п.), то между объективом и окуляром помещают оборачивающие системы. Они предназначаются для оборачивания изображения и удлинения хода лучей в приборе. Линзовые оборачивающие системы применяются двух типов, однообъективные и двухобъективные (рис. 94). 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:

$$L = f'_{об} + \sum L_{oc} + f'_{ок}. \quad (55,5)$$

Каждую оборачивающую систему можно характеризовать ли-

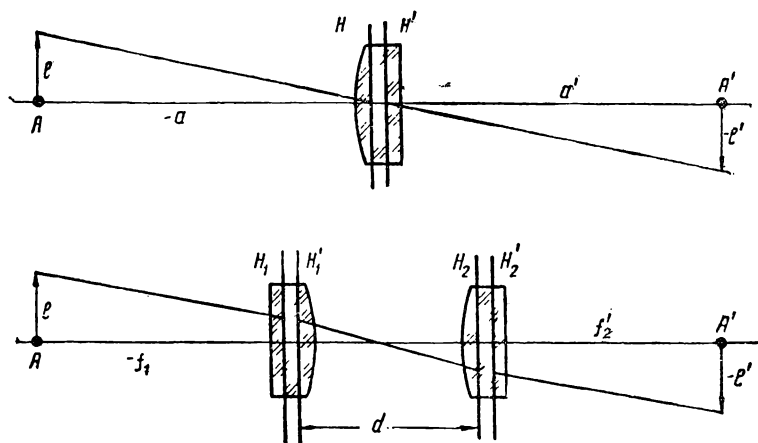


Рис. 94. Оборачивающая система

нейным увеличением. Оборачивающие системы влияют на видимое увеличение всего прибора. Если $\beta_1, \beta_2, \beta_3 \dots \beta_k$ — линейные увеличения оборачивающих систем, то видимое увеличение может быть найдено по формуле:

$$\Gamma = -\beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \dots \cdot \beta_k \frac{f'_{об}}{f'_{ок}} \quad (55,6)$$

Сложные зрительные трубы вместо оборачивающих линзовых систем (рис. 95) могут иметь и призмные оборачивающие системы (например, призмный бинокль).

Габариты телескопической системы определяются длиной и диаметром. Длина системы зависит от фокусных расстояний объектива, окуляра, объективов оборачивающих систем и расстояний между объективами оборачивающих систем.

тем. Диаметр системы зависит от относительных отверстий, углов поля зрения, коэффициента виньетирования и положения зрачков входа и выхода.

Расчет габарита предшествует составление 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.

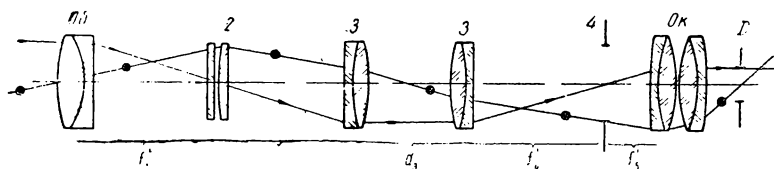


Рис. 95. Зрительная труба с прямым изображением: 1 — сетка; 2 — коллектив; 3 — перевертывающая система; 4 — полевая диафрагма

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 Γ , 2ω , D и L , может быть осуществлена при различных фокусных расстояниях компонентов.

Покажем основы расчета габарита 'сложной телескопической системы, имеющей двухобъективную перевертывающую систему (рис. 95). Для внесения определенности в расчет положим известным фокусное расстояние окуляра. Выбор его обуславливается соображениями удобного размещения глаза наблюдателя (например, $f'_5 = 20$ мм, 25 мм или 30 мм).

Заданными характеристиками будут:

1. Видимое увеличение Γ .
2. Поле зрения 2ω .
3. Диаметр зрачка выхода D'
4. Длина оптической системы от объектива до окуляра L .
5. Коэффициент виньетирования K_ω .
6. Фокусное расстояние окуляра f'_5 .

7. Положение зрчка входа от объектива t .

8. Линейное увеличение β оборачивающей системы, равное отношению f'_4 к f_3 .

Формулы для расчета габарита приведены ниже:

$f'_1 = -\frac{\Gamma \cdot f'_5}{\beta}$	$f'_3 \frac{D' \cdot (1 - K_w)}{f'_5 \cdot \Gamma \cdot \text{tg } \omega_1} + f'_3(1 - \beta) + f'_5(\Gamma + 1) - L = 0$
$f'_4 = -\beta f'_3$	$d_3 = L - f'_1 - f'_3 - f'_4 - f'_5$
$\frac{1}{f'_2} = \frac{1}{f'_1} \left(1 + \frac{t}{f'_1}\right) + \frac{1}{f'_3} \left(1 - \frac{d_3}{2f'_3}\right)$	
$D_1 = DK_w + 2t \text{tg } \omega_1$	$D_2 = 2 \text{tg } \omega_1 f'_1$
$D_3 = \frac{Df'_3}{f'_1}$	$D_4 = D_3$

Если вычисленный диаметр объектива D_1 меньше диаметра зрчка входа D , то за световой диаметр объектива принимается диаметр зрчка входа 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 углом осевого и наклонных лучей по формулам (27,3) и (27,4). При вычислении осевого луча начальными параметрами служат:

$$u_1 = 0 \quad \text{и} \quad h_1 = \frac{D}{2}.$$

В результате получают $u_{\text{посл}} = 0$, что является проверкой правильности выполненных вычислений. При определении хода наклонного пучка лучей выполняют вычисление трех лучей, верхнего, главного и нижнего, по тем же формулам. При вычислении главного луча начальными параметрами служат:

$$\text{tg } u_1 = \text{tg } \omega,$$

$$h_1 = t \cdot \text{tg } \omega,$$

где t — расстояние от первого компонента системы (объектива) до зрачка входа. Вычисление главного луча позволяет найти расстояние от последнего компонента системы (окуляра) до зрачка выхода:

$$t' = \frac{h_{\text{посл}}}{\text{tg } u_{\text{посл}}} .$$

При вычислении верхнего и нижнего пучка учитывается коэффициент виньетирования K_w .

При вычислении верхнего луча начальными параметрами являются:

$$\begin{aligned} \text{tg } u_1 &= \text{tg } \omega, \\ h_1 &= t \cdot \text{tg } \omega + \frac{K_w D}{2}, \end{aligned}$$

а для нижнего:

$$\begin{aligned} \text{tg } u_1 &= \text{tg } \omega, \\ h_1 &= t \cdot \text{tg } \omega - \frac{K_w D}{2} \end{aligned}$$

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 относятся стереотруба (рис. 96), 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 пирометрии, фотограмметрии, гравиметрии, спектроскопии, фотометрии, гониометрии, микроскопии и т. д. Данные об окулярах некоторых зрительных труб приведены в табл. 4 в приложении.

§ 56. Лупа и микроскоп

Оптическая система, предназначенная для наблюдения близко расположенных предметов в увеличенном виде, называется *микроскопом*. Просейшим микроскопом является *лупа*. Каждая лупа характеризуется: 1) видимым увеличением Γ , 2) полем зрения $2l$.

В формуле видимого увеличения (36,1) под углом ω будем понимать угол, под которым виден предмет невооруженным глазом с расстоянием наилучшего зрения, равным для среднего глаза 250 мм. Тогда:

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{l_1}{250} \quad (56,1)$$

Из рис. 97 следует, что:

$$\operatorname{tg} \omega' = - \frac{l_1'}{k'}$$

Из формулы линейного увеличения (22,2) имеем:

$$l_1' = - \frac{l_1 x'}{f'}$$

Но так как $x' = k' + x_1$, то

$$l_1' = - \frac{l_1}{f'} (k' + x_1)$$

и

$$\operatorname{tg} \omega' = \frac{l_1}{f'} \left(1 + \frac{x_1}{k'} \right). \quad (56,2)$$

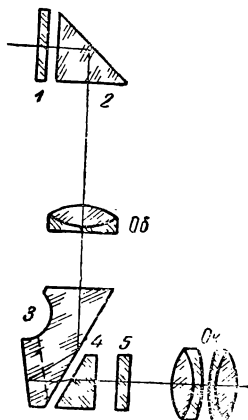


Рис. 96. Оптическая схема стереотрубы: 1—защитное стекло; 2—головная призма; 3—призма с крышей; 4—клин; 5—сетка

Подставив выражения (56,1) и (56,2) в формулу видимого увеличения, получим формулу в общем виде:

$$\Gamma = \frac{250}{f'} \left(1 + \frac{x_1}{k'} \right). \quad (56,3)$$

Если предположить, что предмет расположен в переднем главном фокусе, то $k' = \infty$ и формула лупы получает общеизвестный вид:

$$\bar{\Gamma} = \frac{250}{f'}. \quad (56,4)$$

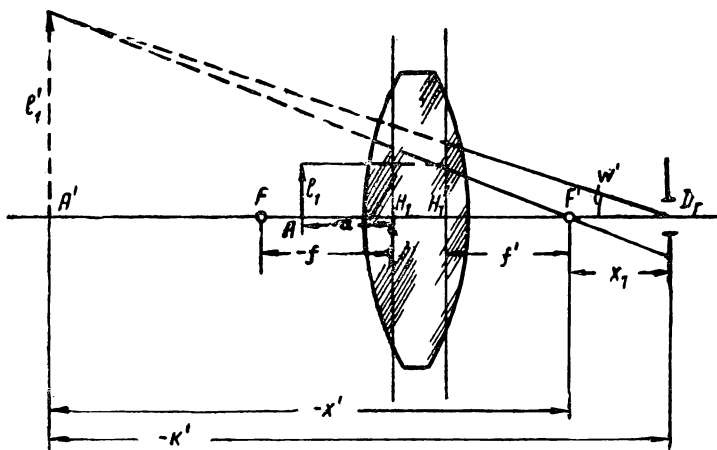


Рис. 97. Лупа

Величину $\bar{\Gamma}$ принято называть окулярным увеличением.

Практически стремятся глаз придвинуть как можно ближе к лупе, тогда $x_1' = -f'$. Кроме того, глаз аккомодирует таким образом, чтобы изображение находилось на расстоянии наилучшего зрения, т. е. $k' = 250$ мм. Тогда из формулы (56,3) следует:

$$\Gamma = \frac{250}{f'} + 1. \quad (56,5)$$

Поле зрения лупы ограничивается aberrациями и ее диаметром.

Из практики применения луп можно указать эмпирическую зависимость между полем зрения и видимым увеличением (в миллиметрах):

$$2l = \frac{150}{\Gamma} \quad (56,6)$$

Плоско-выпуклая линза, обращенная плоской стороной к глазу, может служить лупой с увеличением не свыше $4\times$. Такая лупа часто применяется для отсчета по шкалам. Лупы $6\times$, $10\times$ и $12\times$ обычно состоят из трех склеенных линз. Такая

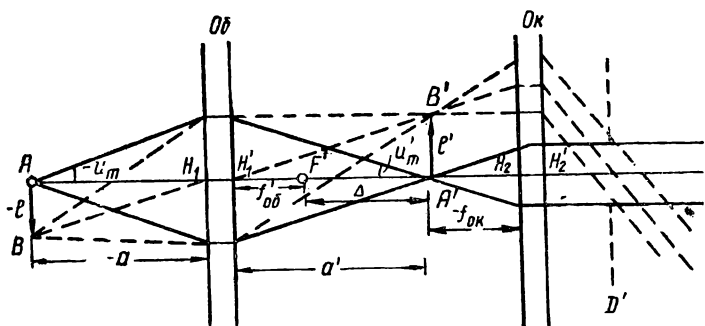


Рис. 98. Микроскоп

лупа называется *апланатической*. Конструктивные данные апланатической лупы $6\times$ приведены ниже:

$$\begin{aligned} r_1 &= 32,7 \text{ мм} & d_1 &= 2,5 \text{ мм, } \Phi \text{ Полный } \varnothing 25 \text{ мм} \\ r_2 &= 16,35 \text{ мм} & d_2 &= 11 \text{ мм, К8} \\ r_3 &= -16,35 \text{ мм} & d_3 &= 2,5 \text{ мм, } \Phi \text{ Световой } \varnothing 23 \text{ мм} \\ r_4 &= -32,7 \text{ мм} \end{aligned}$$

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.

Микроскоп является сложной оптической системой, состоящей, как минимум, из объектива и окуляра. Объектив (рис. 98) 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. Тогда шкала (сетка) будет 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 мм от наблюдателя, для чего теоретически передний фокус окуляра не должен совпадать с плоскостью изображения после объектива. Действительно, при наблюдении в микроскоп изображение кажется расположенным впереди на расстоянии 250—300 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 раздельно 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. 98 совпадает с объективом. В действительности в микроскопах зрачок входа может быть и перед объективом и позади его.

Микроскоп характеризуется: 1) видимым увеличением Γ , 2) полем зрения $2l$, 3) апертурой A .

Объектив образует действительное изображение с линейным увеличением β величиной l' . Это изображение рассматривается при помощи окуляра, работающего, как лупа, с определенным увеличением.

Следовательно, видимое увеличение микроскопа равняется произведению видимого увеличения окуляра на линейное увеличение объектива:

$$\Gamma = \beta \bar{\Gamma}. \quad (56,7)$$

Подставляя в это уравнение выражение (56,4), получим:

$$\Gamma = \frac{250\beta}{f'_{ок}} \quad (56,8)$$

Рассматривая микроскоп в целом как лупу, найдем фокусное расстояние микроскопа по формуле (56,4):

$$f'_m = \frac{f'_{ок}}{\beta} \quad (56,9)$$

Поле зрения микроскопа, как и в случае зрительной трубы, ограничивается полем зрения окуляра. Величина изображения:

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

где ω' — наиболее допустимый угол в пространстве изображений, но

$$l' = \beta l.$$

Тогда, приравнивая и заменяя отношение $f'_{ок} / \beta$ через уравнение (56,8), получим:

$$2l = \frac{500 \operatorname{tg} \omega'}{\Gamma} \quad (56,10)$$

Апертура характеризует светосилу микроскопа и его разрешающую способность. Под *числовой апертурой* понимают произведение показателя преломления среды, в которой помещен предмет, на синус апертурного угла:

$$A = n_1 \sin u_m. \quad (56,11)$$

Из рис. 98 можно установить зависимость между апертурой, диаметром зрачка выхода и видимым увеличением. Положим $n_1 = 1$ и $u_m = A$. Между углами u_m и u'_m имеется зависимость через линейное увеличение объектива, а радиус выхода равен произведению фокусного расстояния окуляра на апертурный угол в пространстве между объективом и окуляром, т. е.

$$u_m = \beta u'_m$$

и

$$D' = 2u'_m f'_{ок}.$$

Решив эти оба уравнения и вводя замену $\beta / f'_{ок}$ из уравнения (56,8), получим:

$$D' = \frac{500A}{\Gamma}. \quad (56,12)$$

Оптическая среда, в которой расположен рассматриваемый

предмет, называется *иммерсией*. В качестве иммерсии применяют воду, глицерин, можжевеловое масло или монобромнафталин.

Предмет устанавливается на предметное стекло микроскопа (рис. 99) 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 показате-

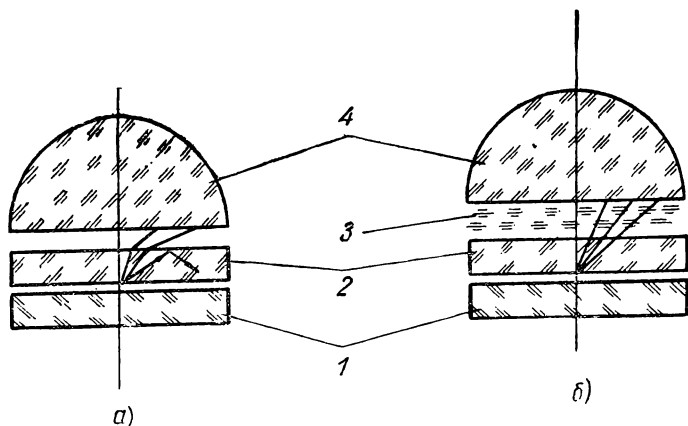


Рис. 99. Роль иммерсии в микроскопе: 1 — предметное стекло; 2 — покровное стекло; 3 — иммерсия; 4 — фронтальная линза объектива

телем преломления, близким к стеклу. Тогда лучи при выходе из покровного стекла не претерпевают полного внутреннего отражения, а проходят в объектив (рис. 99,б).

Апертура микроскопа позволяет определить ожидаемую разрешающую способность по формуле (51,15). Наибольшая достигнутая величина апертуры составляет $A = 1,6$, что при наблюдении в видимых лучах спектра ($\lambda = 0,55 \text{ мк}$) позволяет получить предельно наименьшее расстояние между двумя рассматриваемыми точками в $0,17 \text{ мм}$. Чтобы отдельно рассмотреть такие точки, необходимо обеспечить соответствующее видимое увеличение микроскопа, называемое *полезным*. Оно учитывает разрешающую силу глаза от $2'$ до $4'$ и определяется выражением

$$500A < \Gamma_n < 1000A. \quad (56,13)$$

Таким образом, разумный предел наибольшего увеличения микроскопа при $A=1,6$ составляет 1600 крат. В практике большей частью создают микроскопы, позволяющие получить увеличение до 1350 крат. В особых случаях оно достигает 3500 крат.

Длина микроскопа L главным образом зависит от фокусного расстояния объектива:

$$L = a' + f'_{\text{ок}}. \quad (56,14)$$

Величины a и a' связаны уравнением линейного увеличения, а с фокусным расстоянием объектива — через уравнение отрезков (22,8). Большое фокусное расстояние объектива приводит к громоздким конструкциям, а малое — к трудностям достижения удовлетворительной аберрационной коррекции для большого сравнительно 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 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. 100.

Оптика микроскопа состоит из источника света, конденсора I, зеркала, конденсора II, объектива и окуляра. Но 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. 100 схема освещения предмета является наилучшей и называется *системой Келера*. Источник света проектируется конденсором I в плоскость диафрагмы II, кото-

рая расположена в точке переднего главного фокуса конденсора II. Сзади конденсора I находится ирисовая диафрагма I. Эта диафрагма проектируется конденсором II в плоскость рассматриваемых предметов. 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.

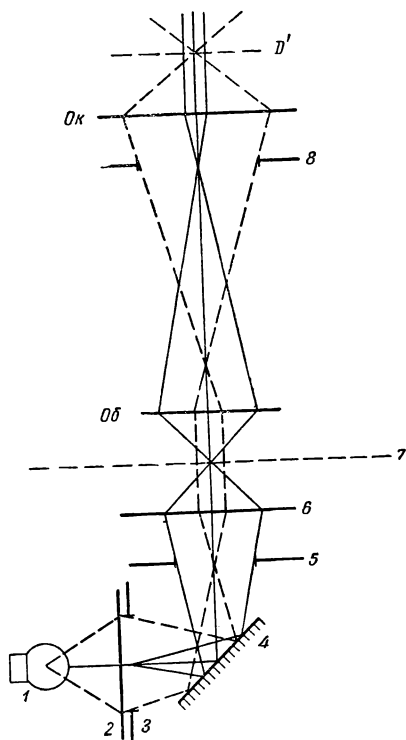


Рис. 100. Оптическая схема микроскопа: 1—источник света; 2—конденсор I; 3—диафрагма I; 4—зеркало; 5—диафрагма II; 6—конденсор II; 7—плоскость предметов; 8—диафрагма поля зрения

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, применяются в микроскопах сильного увеличения, с апертурой более 0,65, и бывают неахроматические и ахроматические (рис. 101).

Для освещения непрозрачных или полупрозрачных предметов служат opak-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° к оптической оси

микроскопа (система Бека). Часть света отражается от поверхности пластинки, проходит через объектив и освещает предмет.

В некоторых микроскопах новейшей конструкции небольшого увеличения стали применяться двухобъективные системы (рис. 102) с параллельным ходом лучей между ними. В этом случае рассматриваемый предмет размещается в передней фокальной плоскости первого объектива, а его изображе-

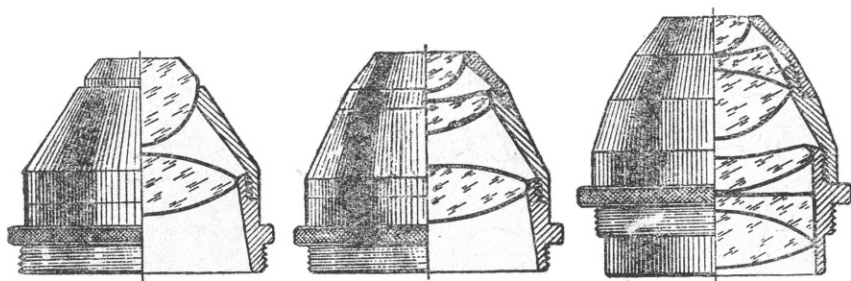


Рис. 101. Конденсоры микроскопа

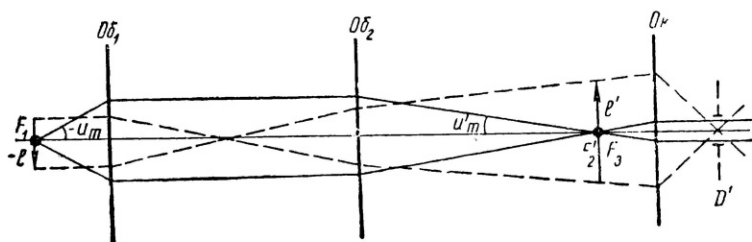


Рис. 102. Двухобъективная система микроскопа

ние после второго объектива получается в задней фокальной плоскости второго объектива, совмещенной с передней фокальной плоскостью окуляра. В этих микроскопах 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. 103).

Объективы микроскопа с увеличением до $\beta = -6$ обычно состоят из двух склеенных линз. Апертура таких объективов не выше 0,15. Объектив микроскопа в виде двух двух-

линзовых склеенных объективов применяется в случае увеличения объектива от 6 до 10. Объективы обозначаются через произведение числа линейного увеличения на апертуру, например $6 \times 0,17$; $8 \times 0,20$; $10 \times 0,25$.

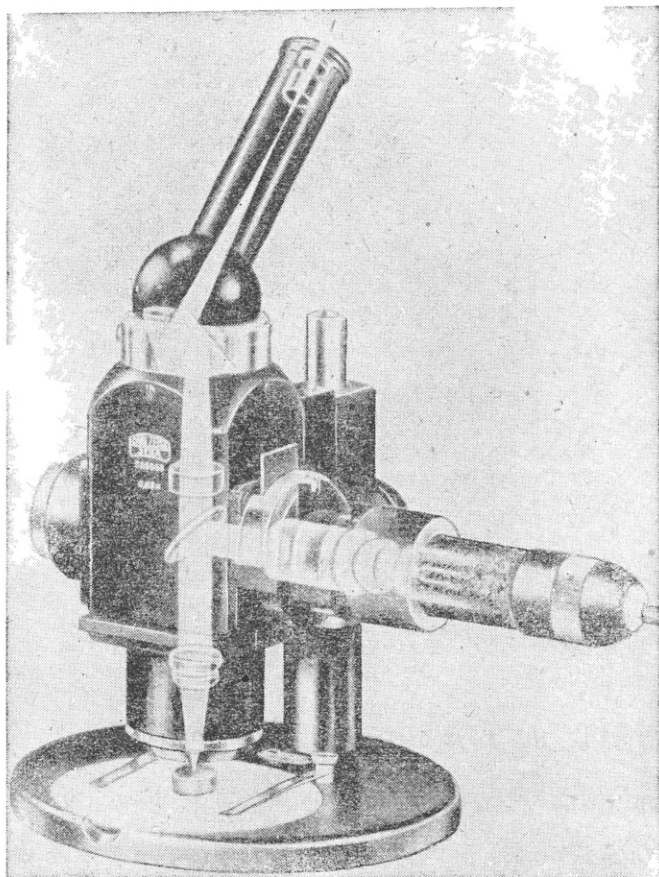


Рис. 103.

Достигнуть большего увеличения при хорошем качестве изображения удается только за счет усложнения конструкции. Конструкции современных микрообъективов показаны на рис. 104.

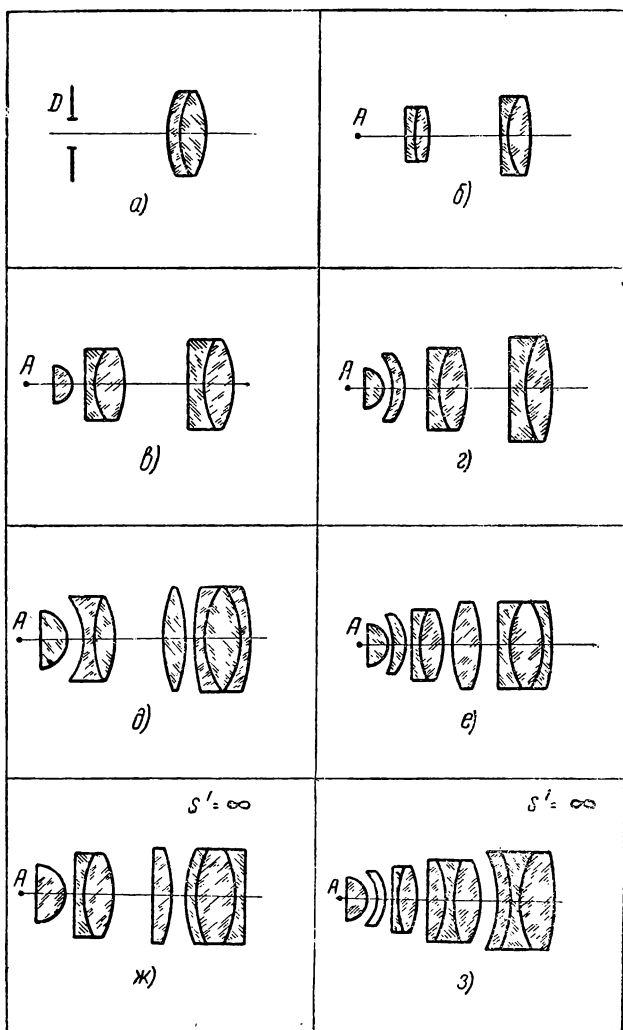


Рис. 104. Микробиъективы: а—от $1 \times 0,0016$ до $6 \times 0,11$ и $7 \times 0,18$; б—от $7 \times 0,17$ до $10 \times 0,25$; в—от $10 \times 0,3$ до $70 \times 0,8$; з— $20 \times 0,7$; $40 \times 0,75$; $95 \times 1,25$; д— $20 \times 0,65$ (апохромат); е— $90 \times 1,35$; ж— $30 \times 0,65$; з— $90 \times 1,3$

В качестве окуляров микроскопа наиболее часто применяют окуляры типа Гюйгенса (см. рис. 90). В отдельных случаях применяют так называемые компенсационные окуляры

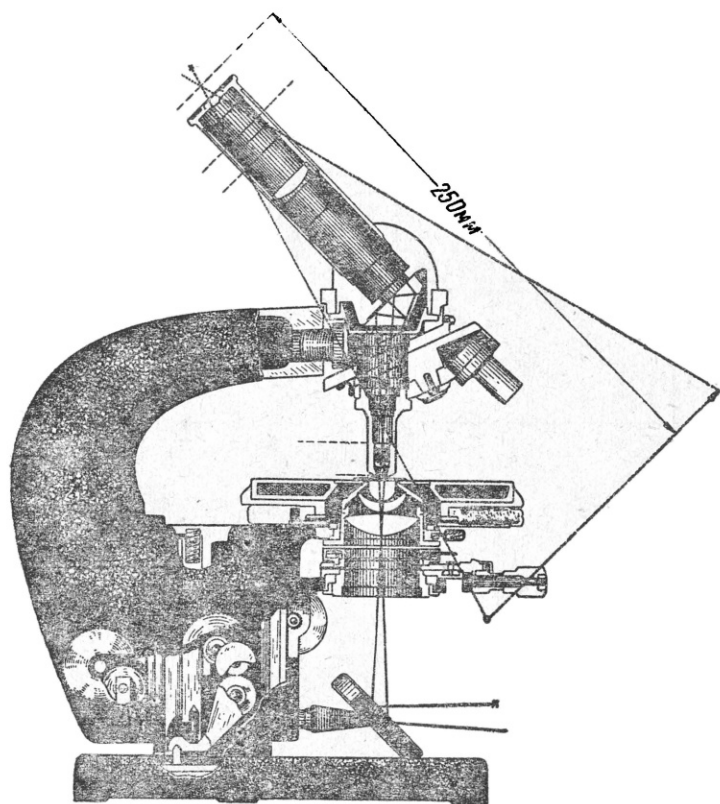


Рис. 105

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. 105.

К оптической системе микроскопа относятся не только собственно микроскопы, биологические, отсечные, 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 микрообъективов и окуляров микроскопов приведены в табл. 5 и 6 в приложении.

§ 57. Фотографический объектив

Фотографическим объективом называется оптическая система, образующая действительное изображение, фиксируемое каким-либо светочувствительным слоем. Развитие фотографии обусловило появление оптических систем, предназначенных для фотографических 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. 106.

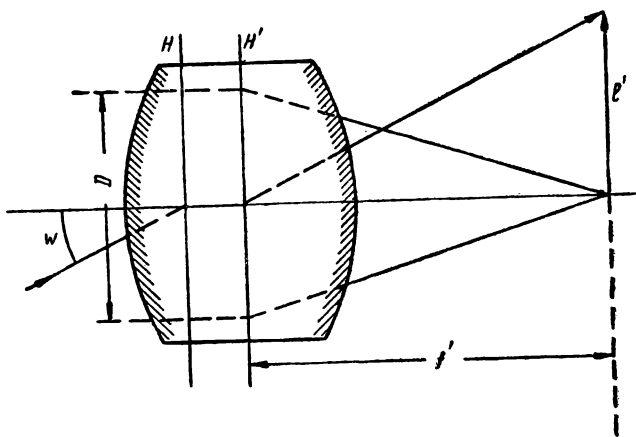


Рис. 106. Фотографический объектив

В большинстве случаев изображение должно образовываться на плоскости, так как плоскую форму имеют фотографические пластинки или пленки. Но иногда объектив образует изображение на шаровой поверхности, цилиндрической

или криволинейной. В этих случаях светочувствительному слою необходимо придавать такую же форму.

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 достаточного 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, $1/V$, 3) поле зрения, 2ω .

Если объектив предназначен для фотографирования близко расположенных предметов, то к числу его основных характеристик также относится линейное увеличение (или масштаб съемки) β . Дополнительными характеристиками объектива являются: 1) разрешающая способность, 2) коэффициент пропускания света, 3) состояние аберрационной 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) дисторзирующие, 12) специальные.

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.

По фокусному расстоянию объективы разделяются на: 1) короткофокусные с f' до 180 мм , 2) нормальные с f' от 180 мм до 300 мм , 3) длиннофокусные с f' более 300 мм .

На практике можно встретить объективы с фокусными расстояниями от нескольких миллиметров до 1800 мм , причем для специальных целей применяют объективы и до $f' = 8000\text{ мм}$.

Относительное отверстие объектива характеризует светосилу. В зависимости от величины относительного отверстия объективы разделяются на: 1) сверхсветосильные, от $1:3,5$ и

более (например, 1 : 2, 1 : 0,9 и т. д.), 2) светосильные, от 1 : 3,5 до 1 : 6,3 и 3) малосветосильные, менее 1 : 6,3 (например, 1 : 6,8; 1 : 15 и т. п.).

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) уз-

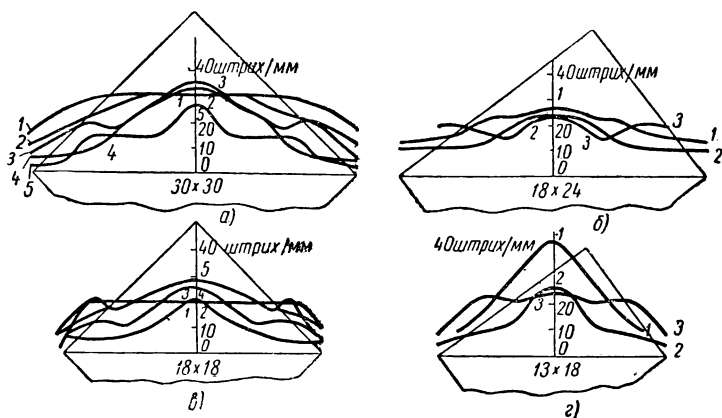


Рис. 107. Разрешающая способность различных аэрофотообъективов: а) 1—«НР-53», 2—«Телемар», 3—«ШР-52», 4—«Орион-1а», 5—«Индустар-А»; б) 1—«Москва», 2—«Индустар-17», 3—«Г-9»; в) 1—«Руссар-19», 2—«Руссар-25», 3—«Индустар-20», 4—«Индустар-13», 5—«Г-10», г) 1—«В-1», 2—«Индустар-4», 3—«Ф-3»

коугольные, 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. Характерным недостатком всех объективов является падение разрешающей способности от центра к краю.

На рис. 107 показаны характеристические кривые разрешающей способности ряда аэрофотообъективов. Если в центре поля разрешающая способность достигает 25—30 линий на миллиметр, то на краю она падает до 4—5. Хорошим объективом считается тот, который имеет для края поля разрешающую способность не менее 12 линий на миллиметр, а в центре

не менее 30 (съемка на панхроматических эмульсиях со светофильтром). Основной причиной падения разрешающей способности в центре поля является сферическая аберрация.

Укажем эмпирическую зависимость между поперечной сферической аберрацией δ' для зоны отверстия и разрешающей способностью N в центре поля при съемках на панхроматических эмульсиях обычными фотообъективами:

$$N = 52 - 0,2\sqrt{165000\delta' - 250000\delta'^2} - 2600. \quad (57,1)$$

В табл. 7 и 8 в приложении приводятся основные оптические характеристики некоторых фотографических и аэрофотографических объективов. Здесь же, в табл. 9, представлены характеристики киносъемочных 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%*

Виньетирование вызывает значительное падение освещенности изображения от центра к краям. 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 позволяют предопределить качество изображения и на основании характеристических кривых аберраций сделать выбор объектива для решения определенных задач.

Обычно большое поле зрения и большая светосила создают большие трудности в исправлении аберрации и остаточные аберрации достигают значительной величины. Поэтому аберрации объектива резко снижают теоретическую разре-

* Сб. «Оптика в военном деле». Изд-во АН СССР, 1945, стр. 304.

шающую 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 «Апотессар», $f' = 600$ мм, показаны на рис. 108.

Особое значение имеет дисторсия для объективов, предназначенных для измерительных целей. Таковыми, например, являются аэрофотосъемочные картографические объективы. Для этих объективов дисторсия не должна превосходить 0,25 мм.

Тип объектива определяется формой линз, их числом и взаимным расположением друг по отношению к другу. Различные типы фотографических объективов показаны на рис. 109.

Четырехлинзовые объективы типа «Тессар» (рис. 109) широко применяются в Советском Союзе и известны под названием «Индустар» (И-4, И-11, И-13, И-17, И-22, И-23, И-50, И-51, И-52, И-55 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 — 25—27 линий на миллиметр в центре и 4—6 на краю.

Особое место среди фотографических объективов занимают телеобъективы. Они отличаются тем, что их общая длина L_0 от первой поверхности до фокальной плоскости короче фо-

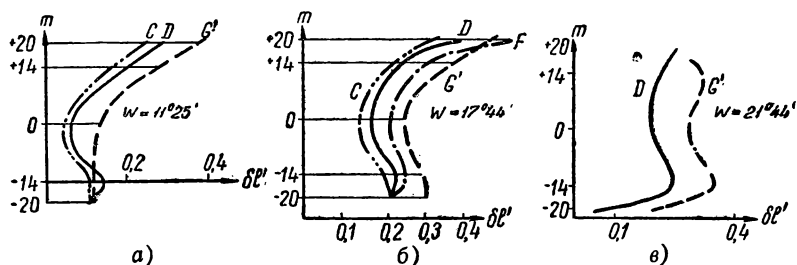


Рис. 108. Аберрации репродукционного объектива «Апотессар»: $f' = 60$ см, 1 : 9; $2\omega = 44^\circ$, l_1 ($\beta = -1$); А — аберрации наклонных лучей: а) $\omega_1 = 11^\circ 25'$; б) $\omega_1 = 17^\circ 44'$; в) $\omega_1 = 21^\circ 44'$

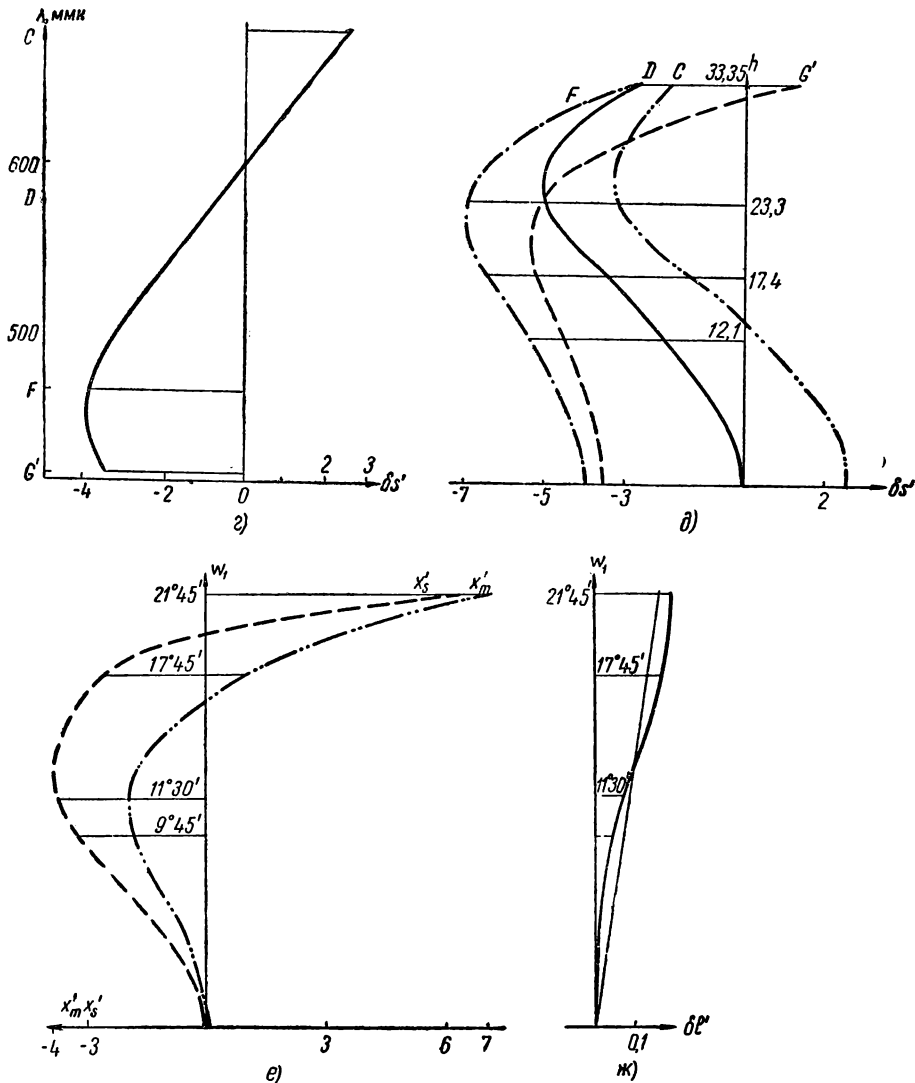


Рис. 108. Аберрации репродукционного объектива «Апотессар»: $f' = 60 \text{ см}$, $1 : 9$; $2\omega = 44^\circ$, $1 : 1$ ($\beta = -1$);
 Б — в) вторичный спектр, д) сферическая и хроматическая аберрации, е) астигматизм, ж) дисторсия

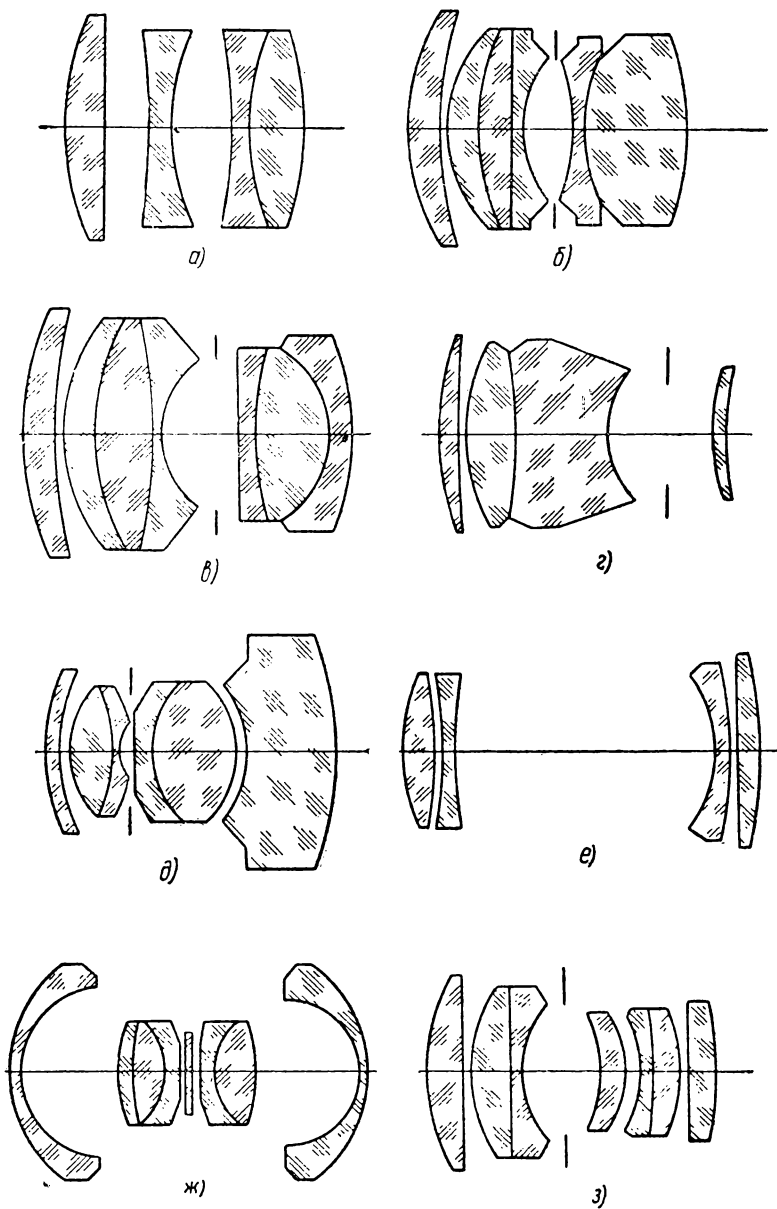


Рис. 109. Типы фотографических объективов: *а* — Индустар, $1:4,5$, $2\omega = 56^\circ$; *б* — Юпитер 8, $1:2$, $2\omega = 45^\circ$; *в* — Юпитер 9, $1:2$, $2\omega = 29^\circ$; *г* — Юпитер 11, $1:4$, $2\omega = 19^\circ$; *д* — Юпитер 12, $1:2,8$, $2\omega = 62^\circ$; *е* — Телемар 17, $1:6,3$, $2\omega = 30^\circ$; *ж* — Руссар 29, $1:6,8$, $2\omega = 122^\circ$; *з* — Уран 12, $1:2,5$, $2\omega = 33^\circ$

кусного расстояния f' . Это достигается тем, что объектив состоит из двух компонентов, из которых задний имеет отрицательное фокусное расстояние. Степень укорочения будем характеризовать коэффициентом телеобъектива k_t :

$$k_t = \frac{L_0}{f'}. \quad (57,2)$$

Оптическая схема телеобъектива, составленного из бесконечно тонких компонентов, показана на рис. 110. Установим зависимость между оптическими силами компонентов Φ_1 и Φ_2 , расстоянием между компонентами d и коэффициентом телеобъектива k . Применяя известные формулы углов (27,3) и высот (11,17) и полагая $h_1 = 1$; $\alpha_1 = 0$ и $\alpha_3 = 1$, получим:

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \Phi_1. \\ h_2 &= 1 - \Phi_1 d. \end{aligned}$$

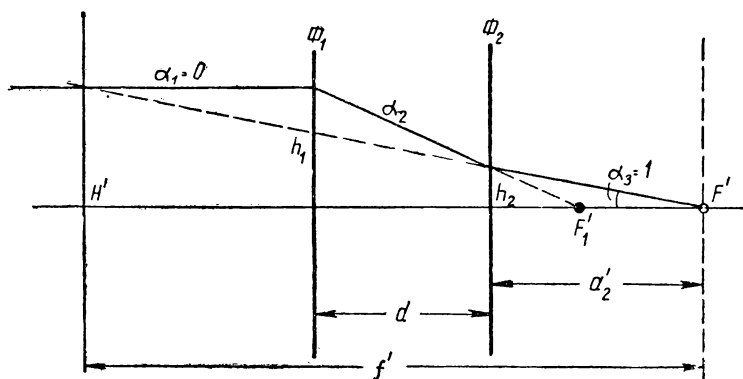


Рис. 110. Оптическая схема телеобъектива

Кроме того, из рис. 110 следует:

$$a'_2 = \frac{h_2}{\alpha_3} = 1 - \Phi_1 d.$$

Но

$$L_0 = d + a'_2 \quad \text{и} \quad k_t = \frac{L_0}{f'},$$

а так как при $f' = 1$, $k_t = L_0$, то

$$k_t = d + a'_2.$$

Таким образом:

$$k_t - d = 1 - \Phi_1 d. \quad (57,3)$$

Из формулы суммы оптических сил при $f' = 1$ (28,5) имеем:

$$\Phi_1 = \frac{1 - \Phi_2}{1 - d\Phi_2} \quad (57,4)$$

Уравнение (57,4) подставим в (57,3), тогда получим:

$$k_t - d = \frac{1 - d\Phi_2 - (1 - \Phi_2)d}{1 - d\Phi_2},$$

откуда

$$\Phi_2 = \frac{1 - k_t}{d^2 - dk_t} \quad (57,5)$$

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.

Оптические системы, состоящие из сферических отражающих поверхностей, имеют преимущество перед системами из преломляющих поверхностей в том, что в первых отсутствует хроматическая аберрация. 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. 111), обращенных выпуклостями в одну сторону. Параллельный пучок света имеет вид кольца. Первое рассеивающее зеркало с радиусами кривизны r_1 направляет часть пучка ab на второе собирательное зеркало с радиусом кривизны r_2 . Второе зеркало в плоскости чертежа имеет размер a_1b_1 . На рис. 111 показан только параллельный пучок лучей. Наклонный пучок увеличит размеры второго зеркала. Фокусное расстояние всей системы может быть найдено по формуле оптической силы двух линз (28,5).

Придавая оптической силе рассеивающего зеркала отрица-

тельное значение и заменяя по формуле зеркала $\Phi = \frac{2}{r}$, получим:

$$f' = \frac{r_1 r_2}{2(r_1 - r_2 + 2d)}. \quad (57,6)$$

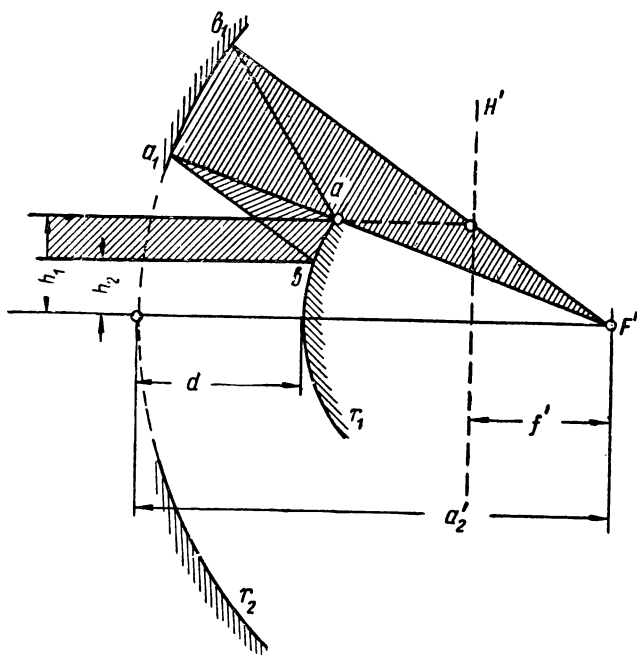


Рис. 111. Сложная зеркальная система

Положение точки фокуса F' от зеркала с радиусом кривизны r может быть найдено по известной формуле зеркала:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{r}. \quad (57,7)$$

Если предмет расположен в бесконечности, т. е. $s_1 = -\infty$, то $s'_1 = \frac{r_1}{2}$, тогда $s_2 = \frac{r_1}{2} + d$ и искомая величина s'_2 найдется после преобразований по формуле:

$$s'_2 = \frac{r_2(2d + r_1)}{2(2d + r_1 - r_2)}. \quad (57,8)$$

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

$$s'_2 = \frac{r_2 [d(2s_1 - r_1) + r_1 s_1]}{2d(2s_1 - r_1) + 2s_1(r_1 - r_2) + r_1 r_2} \quad (57,9)$$

Так, если $s_1 = -100$, то $s'_2 = 216,6$ мм.

При определении относительного отверстия такой зеркальной системы учитывается кольцеобразная форма зрачка входа. Площадь зрачка входа найдется по формуле:

$$S = \pi (h_1^2 - h_2^2). \quad (57,10)$$

Приводя к площади круглого зрачка, найдем радиус условного зрачка входа:

$$\frac{D}{2} = \sqrt{h_1^2 - h_2^2}. \quad (57,11)$$

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. 112).

Данные о некоторых зеркально-линзовых объективах собраны в табл. 10 в приложении.

Известны компенсаторы различных конструкций (рис. 113). 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.

Идея применения мениска в качестве компенсатора аберраций зеркальной системы принадлежит Д. Д. Максудову (1941). В настоящее время во многих отраслях техники, в фотографии, в кинематографии, астрономии, геодезии, военной оптике, находят себе применение подобные объективы.

Расщепление мениска Максута на две линзы с воздушной прослойкой между ними создало афокальный компенсатор нового типа (Волосов, Галблерн и Печатникова, 1945 г.). Превращение менисковой одиночной линзы в двухлинзовую ахро-

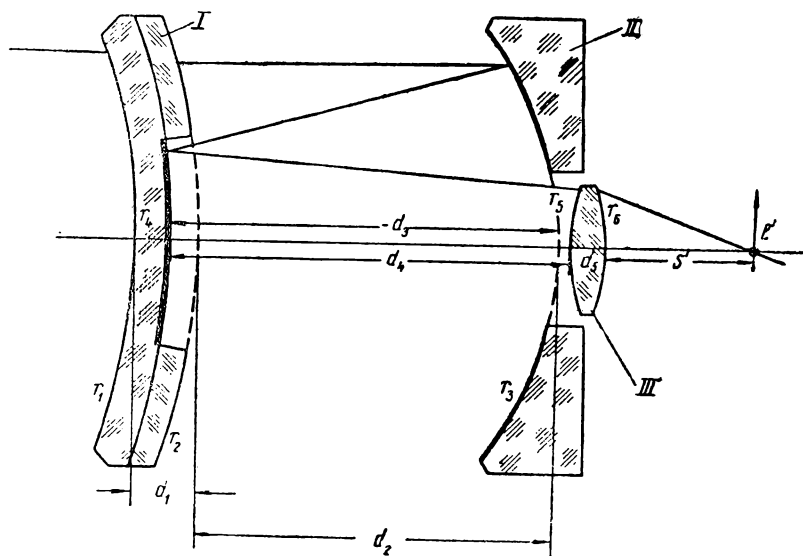


Рис. 112. Упрощенная схема зеркально-линзового объектива

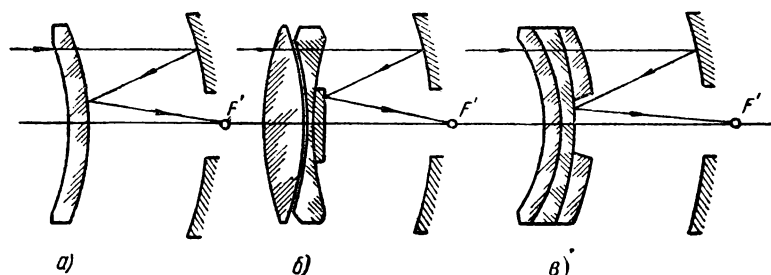


Рис. 113. Зеркально-линзовые системы с различными компенсаторами

матическую систему позволило получить еще лучшую коррекцию хроматических aberrаций (Бегунов и Новик, 1952 г.) и осуществить кинесъемочный объектив с $f' = 500$ мм с высокой разрешающей способностью.

В приложении в табл. 11 и 12 мы приводим 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.

§ 58. Осветительные системы

Осветительные системы служат для освещения предмета, рассматриваемого или проектируемого с помощью оптического прибора. Они должны позволить наилучшим образом использовать 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 $НН'$ проектирует изображение источника света в плоскость предмета (рис. 114, а). В этом случае изображение источника света совмещается с самим предметом. Примерами такого освещения являются кинопроекторные аппараты и спектральные приборы.

2. Конденсор $НН'$ проектирует изображение источника света в зрачок входа объектива последующей оптической системы (рис. 114, б). В этом случае освещенный предмет l располагается как можно ближе к конденсору. Примерами такого освещения являются диапроекторы, трансформаторы, спектральные приборы. Этот вид освещения является наиболее распространенным.

3. Конденсор $НН'$ проектирует изображение источника света в бесконечность (рис. 114, в). Примерами такого освещения являются прожекторы и коллиматоры фотореле.

Оптическими характеристиками конденсора являются: 1) фокусное расстояние, f , 2) линейное увеличение, β , 3) относительное отверстие, $1/\nu$, 4) угол охвата, 2ω , 5) угол сходимости, ω .

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:

$$\operatorname{tg} A = \frac{D}{2a},$$

в котором диаметр зрачка входа D выразим через диафраг-

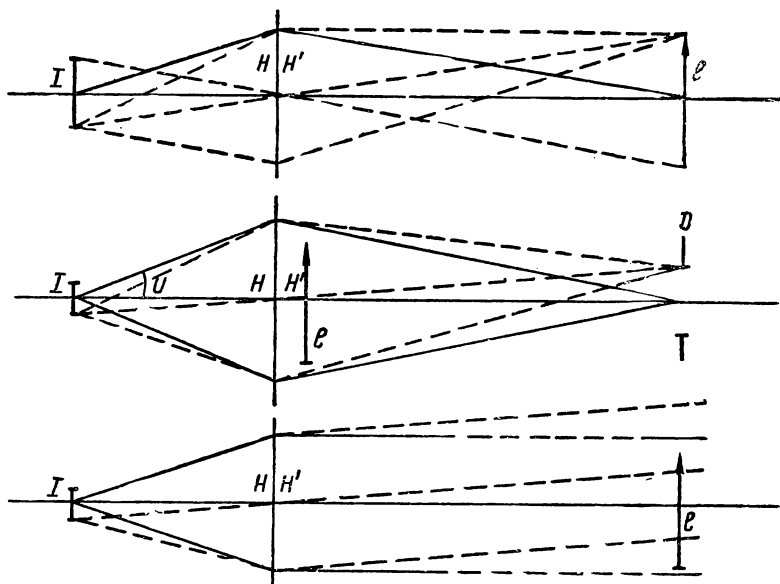


Рис. 114. Схемы освещения конденсором NN' предмета I , J — источник света

менное число, ν , по (39,4), а передний отрезок a — через линейное увеличение по формуле (22, 10). Тогда получим:

$$\operatorname{tg} 2u = - \frac{\beta}{(1 - \beta)\nu} \quad (58,1)$$

Чем больше угол охвата, тем больше светового потока используется 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 вольтовые дуги и кинопроекторные лампы, имеющие световое тело наклона в виде прямоугольной системы ряда нитей (например, электролампы К12, К15, К22).

Положение изображения источника света в совмещении с самим предметом или вблизи него вызывают его сильный нагрев. Применение теплофильтров снижает нагрев, но не исключает его. Вследствие этого становится невозможным применение этой системы 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 зрачок входа объектива также был полностью заполнен светом. Для этого изображение светового тела источника света должно быть несколько больше диаметра зрачка входа 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 будет мешать 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. 115) выходит широкий пучок лучей. После преломления в конденсоре лучи вследствие сферической аберрации не собираются в точке A' . В результате этого образуется каустическая поверхность. Наиболее ярко это сказывается в одиночной линзе, однако и более сложные системы не свободны от этого недостатка.

Если теоретически последующую оптическую систему (объектив) надо было бы располагать так, чтобы ее световое отверстие совмещалось с A' , то на практике оно должно со-

впадать с плоскостью GG' в наиболее узком месте каустики. Тогда наибольшее количество лучей пройдет через объектив. Но и 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 aberrация уменьшает угол сходимости лучей ω . Для увеличения угла сходимости ω становится необходимым увеличивать число линз в конденсоре, вычисляя его на минимум сферической aberrации. Число линз в сферических конденсорах доходит до 6.

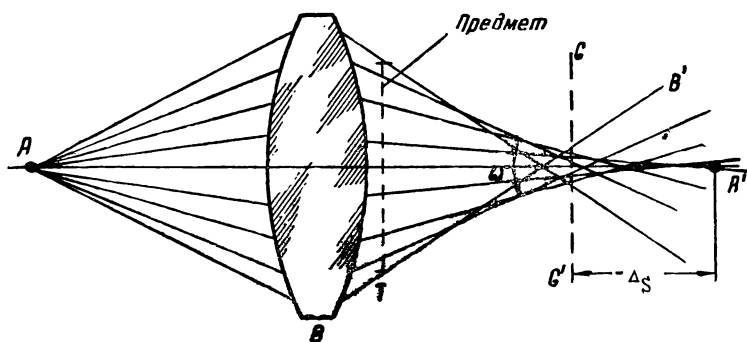


Рис. 115. Каустика конденсора, Δ_S — положение плоскости наилучшей наводки

Однолинзовый конденсор. Одна простая линза применяется в виде конденсора, если сумма углов охвата и сходимости не превышает 45° . 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 сопровождается рассмотрением структуры пучка лучей в меридиональной плоскости (рис. 115).

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.

4. Конденсор в виде плоско-выпуклой линзы (табл. 13) имеет конструктивные элементы: $r_1=14,22$ мм, $r_2=\infty$, $d=6$ мм, стекло БК10 с $n=1,5688$, диаметр 20 мм, $f'=25$ мм, $s'_F=21,17$ мм. Источник света расположен в бесконечности.

Таблица 13

h_1	v	Продольная сферическая aberrация $\delta s'$, мм	Диаметр кружка расстояния δ' , мм	Положение плоскости наилучшей наводки Δ_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

Таблица 14

$-\text{tg } u_1$	v	$\delta s'$, мм	δ' , мм	Δ_s , 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

Если конденсор проектирует световое тело источника света в масштабе 1:1 ($\beta=-1$), то наилучшей формой линзы является двояковыпуклая с равными радиусами.

II. Конструктивные данные конденсора (табл. 14): $r_1=27,3$ мм, $r_2=-27,3$ мм, $d=6$ мм, стекло БК10 с $n=1,5688$, диаметр 20 мм, $f'=25$ мм, $s'_F=23$ мм. Источник света распо-

ложен на двойном фокусном расстоянии от конденсора ($s_1 = -48$ мм).

Если конденсор применяется при других масштабах проекции ($\beta \neq 0$ и $\beta \neq 1$), то его форма должна удовлетворять условию минимума сферической аберрации.

Из теории аберраций 3-го порядка известна формула сферической аберрации (при $\alpha_1 = \beta$, $\alpha_3 = 1$, $n_3 = 1$):

$$\delta s'_{\text{III}} = -\frac{1}{2} \operatorname{tg}^2 u' \sum_{k=1}^{k=3} h_k P_k, \quad (58,2)$$

где

$$P_k = \left(\frac{\alpha_{k+1} - \alpha_k}{\mu_{k+1} - \mu_k} \right)^2 (\alpha_{k+1} \mu_{k+1} - \alpha_k \mu_k). \quad (58,3)$$

Здесь α — угол параксиального луча с оптической осью; h — высоты того же луча, определяемые по формуле (27, 4); μ — величина, обратная показателю преломления; u' — апертурный угол в пространстве изображений, $\delta'_{s\text{III}} = 0$ при условии $\Sigma hP = 0$.

Составив суммы $\Sigma P = P_1 + P_2$ (при $d = 0$ и $h_1 = h_2 = 1$) и продифференцировав, получим выражение для α_2 , удовлетворяющее условию минимума сферической аберрации при заданном линейном увеличении β :

$$\alpha_2 = \frac{(2 + \mu)(3 + 1)}{2(1 + 2\mu)} \quad (58,4)$$

Двухлинзовый конденсор применяется, если сумма углов охвата и сходимости достигает 60° . Так как плоско-выпуклая линза имеет сферическую аберрацию, 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 выпуклостями обращены друг к другу, у каждой линзы их главные плоскости совпадают с вершинами, а при их соприкосновении, согласно (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. 15): $r_1 = \infty$, $r_2 = -14,22$ 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 ($\beta = -1$).

Трехлинзовые конденсоры позволяют получить сумму углов охвата и сходимости до 100° . Дальнейшее увеличение линз в конденсорах не выгодно, так как значительно увеличиваются потери света. 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°

Таблица 15

$\text{tg } u_1$	ν	$\delta s', \text{ мм}$	$\delta', \text{ мм}$	$\Delta_s, \text{ мм}$	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 особой конструкции (рис. 116) 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 в зрачок входа 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 K_2 , выполняющей роль коллектива. Третья конденсорная линза K_3 проектирует изображение источника света в зрачок входа объектива. Осевой пучок лучей показан сплошными линиями, а наклонный — пунктирными. Вследствие такой конструкции осветителя создается промежуточное изображение источника света в плоскости линзы K_2 . Если вплотную к линзе K_2 установить диафрагму, то возник-

кает возможность выделения желаемых участков светящегося тела.

В качестве осветительных систем применяются и зеркала. Среди зеркальных систем различают: 1) сферическую отражательную поверхность, 2) поверхность параболоида вращения, 3) поверхность эллипсоида вращения, 4) сложные системы из сферических поверхностей.

Простая отражательная сферическая поверхность имеет ограниченное применение вследствие значительной сфериче-

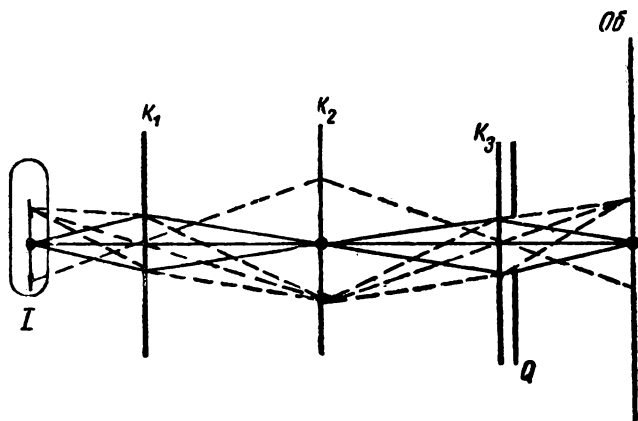


Рис. 116. Трехлинзовый конденсор спектрографа:
 K_1, K_2, K_3 — конденсорные линзы; I — источник света; Q — щель

ской 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 фокусе параболы, то поверхность параболои-

да 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 зрачок входа объектива — в другом, то возможно равномерно осветить предмет, который должен проектироваться этим объективом. Оптическая схема подобной системы освещения показана на рис. 117. Она широко применяется в фотограмметрических приборах — трансформаторах и уменьшителях, а также в кинопроекторах.

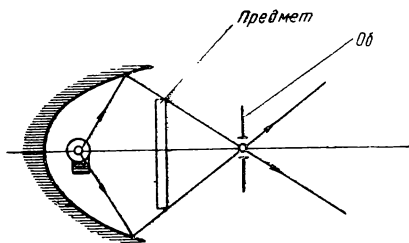


Рис. 117. Зеркальная осветительная система

Сложные зеркальные системы из двух сферических поверхностей (см. рис. 111) применяются для освещения экрана осциллоскопов, например, ультрафиолетовым светом, при некоторых специальных наблюдениях.

§ 59. Проекционные системы

Оптические приборы, дающие изображения на экране, называются *проекционными*. К числу таких приборов относятся: кинопроекторный 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 соот-

ветствовать 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. 118. Прибор имеет вид шара с плоским основанием, к которому снизу прижимают проектируемый предмет (чертеж, текст, картинку),

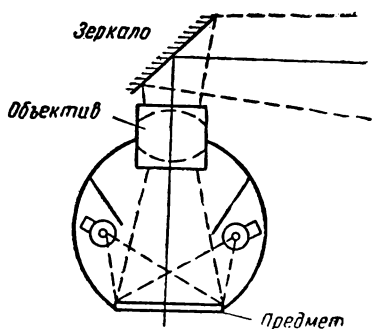


Рис. 118. Эпископ

и круглым вырезом в верхней части, в который ввинчивают объектив. Над объективом всегда укрепляют алюминированное плоское зеркало для получения на экране правильного прямого изображения.

К числу приборов диаскопической проекции относятся, например, фотоувеличители, проекторы, приме-

няемые в аэрогеодезии (двойной проектор Дробышева, мультиплекс) и др. Схема такого прибора показана на рис. 119, а. Источник света с помощью конденсора проектируется во входной зрачок объектива (см. рис. 114, б). Предмет в виде негатива или диапозитива устанавливается возможно ближе к конденсору.

Кинопроекционные системы (рис. 119, б) также относятся к диаскопическим. Но в этих системах для достижения лучшей освещенности экрана зеркальная или линзовая конденсорные системы проектируют изображение источника света в области положения самого предмета — кинокадра (см. рис. 114, а). Малый размер кинокадра (16×22 или 18×24 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 (рис. 120). Такой прибор используется для демонстрации графиков, рисунков и т. п. при проведении лекций и докладов.

Оптическими характеристиками проекционных систем являются: 1) величина проектируемого предмета, 2) размер

экрана, 3) масштаб проекции (линейное увеличение), 4) проекционное расстояние, 5) освещенность изображения, 6) фокусное расстояние проекционного объектива, 7) относительное отверстие проекционного объектива.

Размеры проектируемых предметов бывают весьма различными — от десятых долей миллиметра (микропроекция) до 30×30 см (большой и малый фототрансформаторы). Также

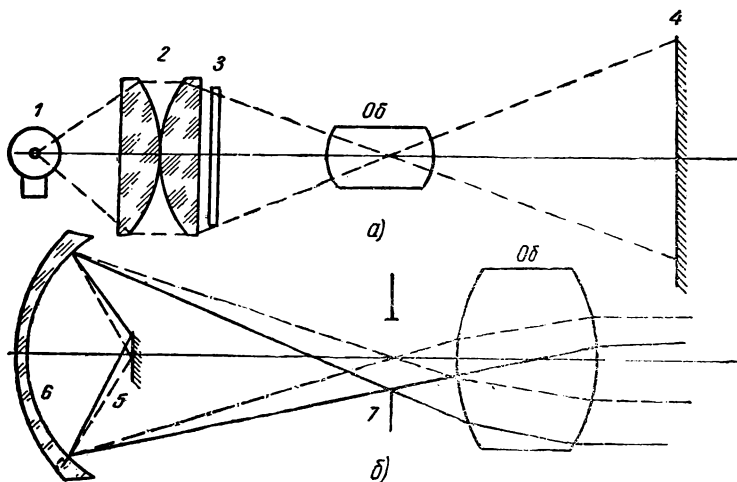


Рис. 119. Диапроекция: 1—источник света; 2—конденсор; 3—негатив (диапозитив); 4—экран; 5—кратер дуги; 6—зеркало; 7—кадр

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, к $10:1$, 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 τ , линейным увеличением объектива β , диафрагменным числом объектива ν или его апертурой A .

В случае эпископической проекции освещенность изображения равна:

$$E' = \frac{\tau \cdot \rho \cdot E}{4(1 - \beta)^2 V^2}, \quad (59,1)$$

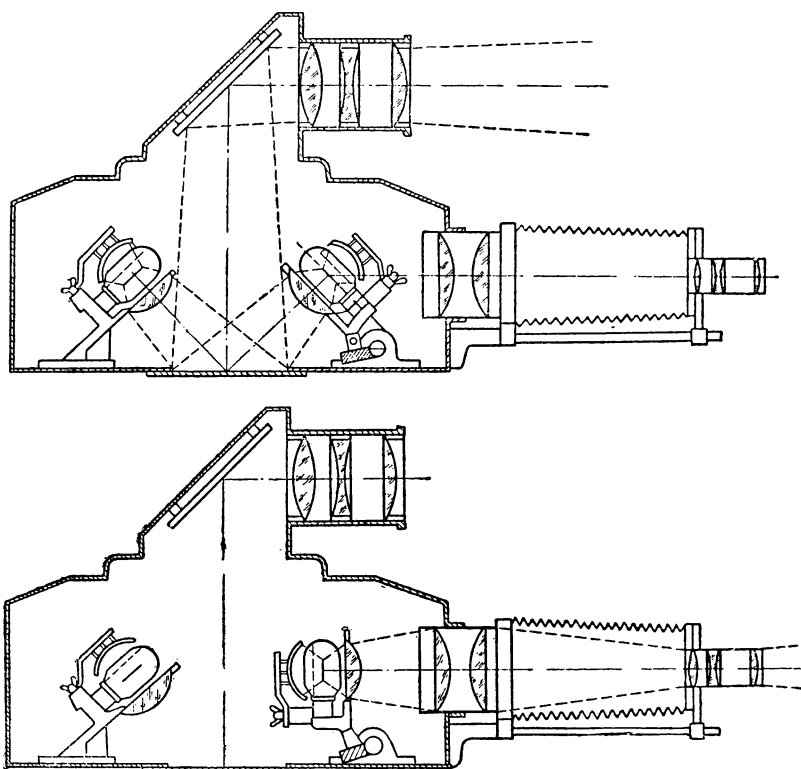


Рис. 120. Эпидиаскоп

где ρ — коэффициент отражения предмета, E — освещенность предмета (в люксах).

В случае диаскопической проекции освещенность изображения равна:

$$E' = \frac{\pi B \tau}{4V^2(1 - \beta)^2}. \quad (59,2)$$

Освещенность изображения на экране в случае кинопроекции определяется формулой:

$$E' = \frac{\pi B \tau A^2}{\beta^2} \quad (59,3)$$

Освещенность экрана в кинотеатрах составляет 60—120 лк.

Проекционный объектив имеет большую светосилу, а по свойствам и конструкции близок к фотографическому (рис. 121). Проекционные объективы разделяются на три группы:

1. Епископические объективы с относительными отверстиями 1:2,5—1 3,5 и полем зрения $2\omega=45^\circ$.

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. 13 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° .

Решение. Из условий примера следует: $\beta=-10$; $\nu=2$; $\tau=0,6$; $\rho=0,8$; $i=45^\circ$; $r=0,2$ м.

Решение задачи разделяется на два этапа: Первоначально по формуле (38, 7) необходимо найти освещенность предмета, а затем по формуле (59, 1) освещенность экрана.

Освещенность предмета не является равномерной по всей площади, но наименее освещаемые участки одной лампой получают наибольшую освещенность от другой, поэтому в практике определяют освещенность в центре предмета и ее принимают за условную освещенность всего предмета.

Из каталога электрических ламп накаливания имеем $I=700$ св, тогда освещенность предмета

$$E = \frac{2I \cos i}{r^2} = 24\ 800 \text{ лк,}$$

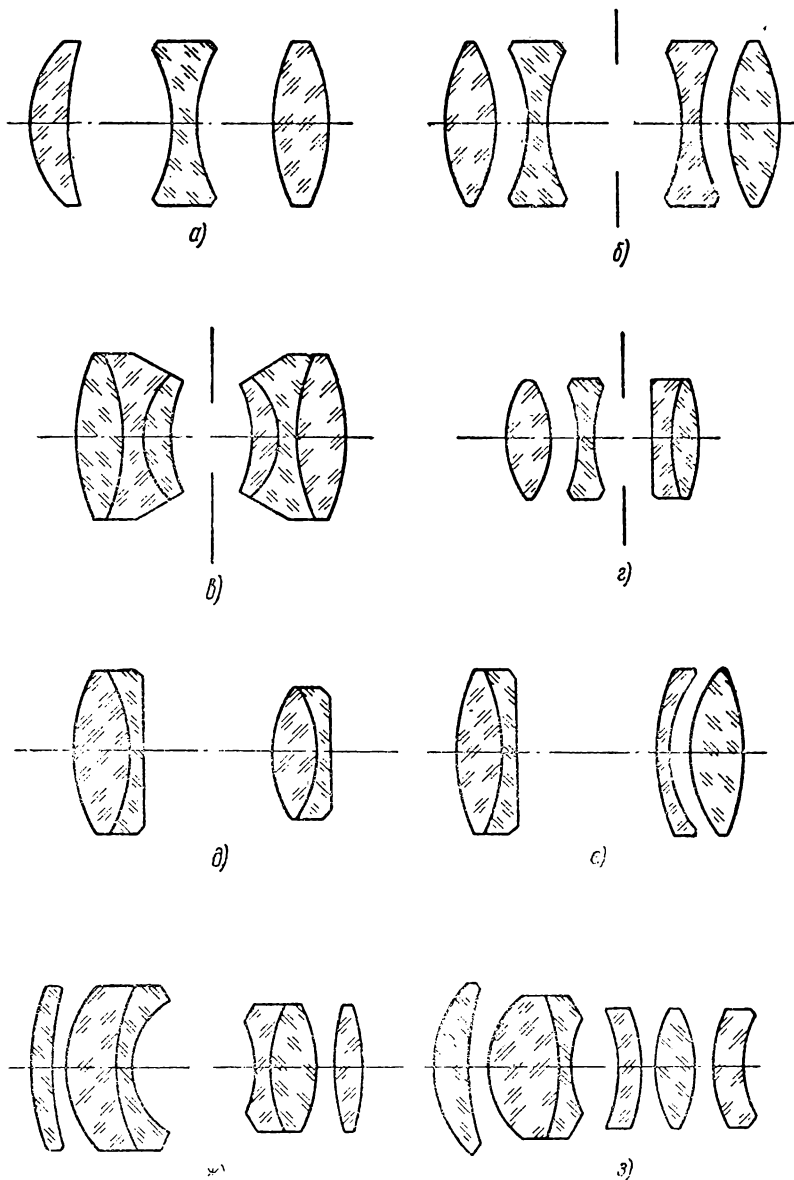


Рис. 121. Проекционные объективы: *a* — Полинар, Триплет, 1 : 3,5, $2\omega = 45^\circ$; *б* — Орто-Ниар, 1 : 6,3—1 : 7,7, $2\omega = 60^\circ$; *в* — Луч, 1 : 6,8, $2\omega = 70^\circ$; *г* — И—23У, РО—51, 1 : 3,5, $2\omega = 50^\circ$; *д* — РО—101, РО—106, РО—107, 1 : 2,2, $2\omega = 12^\circ$; *е* — РО—108, 1 : 2, $2\omega = 16^\circ$; *ж* — 8Л—82, РО—800, РО—59, 1 : 2, $2\omega = 14^\circ$; *з* — РО—109, РО—110, РО—111, 1 : 1,2, $2\omega = 20^\circ$

а экрана

$$E' = \frac{\tau \rho E}{4(1-\beta)^2 \nu^2} = 6,1 \text{ лк.}$$

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 светопропускания оптической системы диапроектора составляет 0,6. Найти освещенность экрана.

Решение. Из условий примера следует: $\tau=0,6$; $\nu=5$; $\beta=-10$. Из табл. 3 следует: $B=22 \cdot 10^5 \text{ нит}$.

Применим формулу (59, 2):

$$E' = \frac{\pi B \tau}{4 \nu^2 (1-\beta)^2} = 342 \text{ лк.}$$

Пример 28. Определить освещенность экрана в кинотеатре при проекции с 400-кратным увеличением объективом с относительным отверстием 1:2, если коэффициент светопропускания оптической системы составляет 0,5, а яркость источника света (дуга) $1,5 \cdot 10^8 \text{ нит}$.

Решение. Объектив с относительным отверстием 1/2 имеет апертуру $A=0,25$, а 400-кратному увеличению соответствует $\beta=-400$.

Применим формулу (59, 3):

$$E' = \frac{\pi B \tau A^2}{\beta^2} = 93 \text{ лк.}$$

§ 60. Коллиматоры и автоколлиматоры

Коллиматором называется оптический прибор, образующий параллельный пучок лучей. Коллиматор часто применяется для всякого рода контрольных испытаний и исследований оптических деталей и узлов. Он является частью ряда приборов: спектральных, контрольно-измерительных, прицельных, приборов связи и сигнализации и др. Оптическая схема коллиматора показана на рис. 122. 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 в фотоэлемент (рис. 123). Если пучок лучей преградить, то прекратится пропуск лучей в 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 ис-

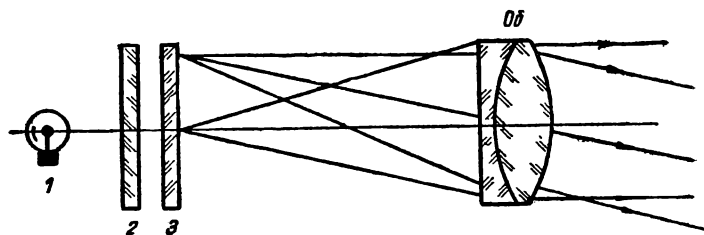


Рис. 122. Коллиматор: 1—источник света; 2—молочное или матовое стекло; 3—сетка

пользуется 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. 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. 123, 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 удается уменьшить угол светового рассеяния лучей до $7'$. Местоположение фотоэлемента не зависит от коллиматора. Расстояния между ними 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.

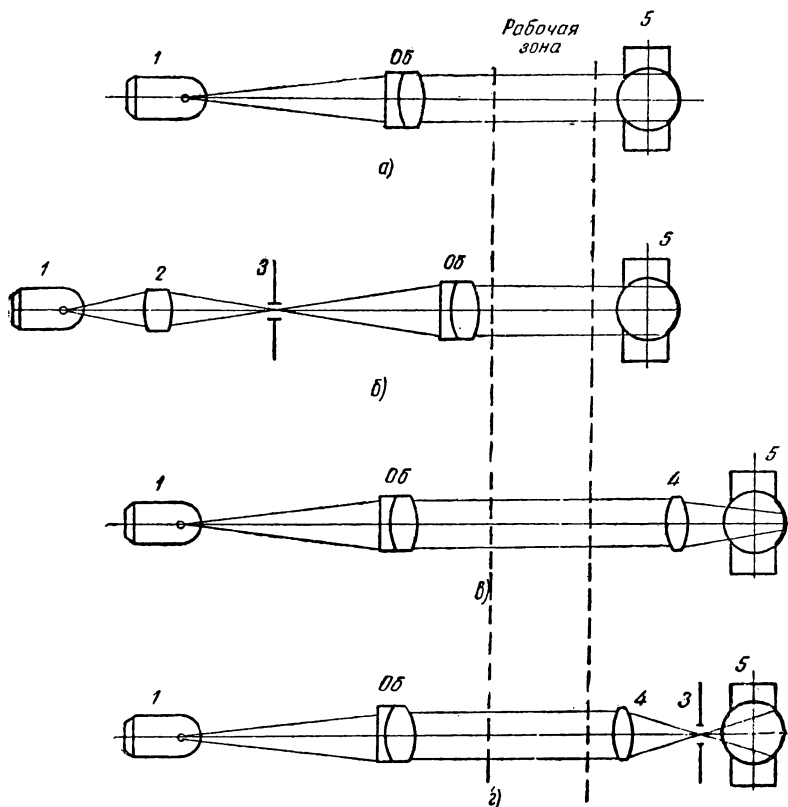


Рис. 123. Оптические схемы фотореле: 1—источник света; 2—конденсор; 3—диафрагма; 4—линза; 5—фотоэлемент

Освещенность фотоэлемента практически равна освещенности зрачка выхода объектива, тогда на основании (38, 5)

$$E' = \frac{F'}{S_0},$$

где S_0 — площадь зрачка выхода объектива.

Воспользуемся формулой (39, 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:

$$u' = \frac{1}{2V}$$

где V — диафрагменное число объектива.

Тогда получим:

$$E = \frac{\pi B \tau}{4V^2}$$

Определим световой поток, пронизывающий отверстие этой диафрагмы с площадью S . $F' = SE$. Площадь отверстия этой диафрагмы

$$S = \pi \frac{\sigma^2}{4};$$

где σ — 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 σ понимается диаметр отверстия. Тогда

$$F' = \frac{\pi^2 B \tau \sigma^2}{16V^2}. \quad (60,1)$$

Если диаметр отверстия диафрагмы равен диаметру изображения светового тела, то световой поток можно найти по формуле:

$$F' = \frac{F_0 \tau}{16V^2}, \quad (60,2)$$

где F_0 — общий световой поток источника света, известный из каталога.

Если отверстие диафрагмы меньше изображения светового тела, то световой поток так же можно вычислить по формуле (60, 2), но вместо значения светового потока источника света F_0 из каталога необходимо подставить вычисленное по формуле

$$F = \frac{F_0 \sigma^2}{l_0^2},$$

где l_0 — диаметр светового тела источника света, т. е. в этом случае

$$F' = \frac{F_0 \tau c^2}{16V^2 l_0^2} \quad (60,3)$$

Для определения освещенности зрачка выхода объектива, и, что практически одно и то же, освещенности поверхности фотоэлемента, на которую падает параллельный пучок лучей, воспользуемся формулой (60,3). 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 зрачка выхода объектива S_0 равна:

$$S_0 = \frac{\pi D^2}{4}$$

тогда

$$E' = \frac{\tau F_0 c^2}{4\pi f'^2 l_0^2} \quad (60,4)$$

Фотоэлемент может быть заменен другим светоприемником — фотоспротивлением или фотоумножителем.

Освещенность на поверхности светоприемника может быть изменена, если перед ним на пути параллельного пучка лучей поставить линзу, которая сфокусировала бы пучок лучей на некоторый участок площади S_c светоприемника (рис. 123, в). Тогда освещенность участка поверхности светоприемника на основании формул (38,5) и (60,3) будет равна:

$$E' = \frac{\tau F_0 c^2}{16V^2 S_c l_0^2} \quad (60,5)$$

В таких случаях часто участок засвечиваемой поверхности принимают диаметром $\sim 4-6$ мм.

Для предохранения от засветки рабочей поверхности светоприемника посторонним боковым светом между линзой и светоприемником задней фокальной плоскости линзы устанавливают диафрагму (рис. 123, г).

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 параллель-

ном пучке прожекторов, относительные отверстия которых превосходят 1:2, следует применять формулу Корякина:

$$E = I\tau \frac{\cos^4 \frac{u'}{2}}{f'^2}, \quad (60,6)$$

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. 124.

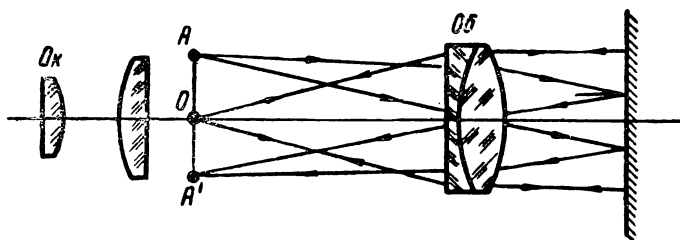


Рис. 124. Автоколлиматор

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.

$$l' = f' \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \quad (60,7)$$

Автоколлимационный принцип образования изображения нашел себе применение в спектральных приборах, в оптимет-

рах и многих других контрольно-измерительных и юстировочных приборах (рис. 125). Характерным отличием визуальных автоколлимационных приборов является наличие *автоколлимационного окуляра*. Любой положительный окуляр можно

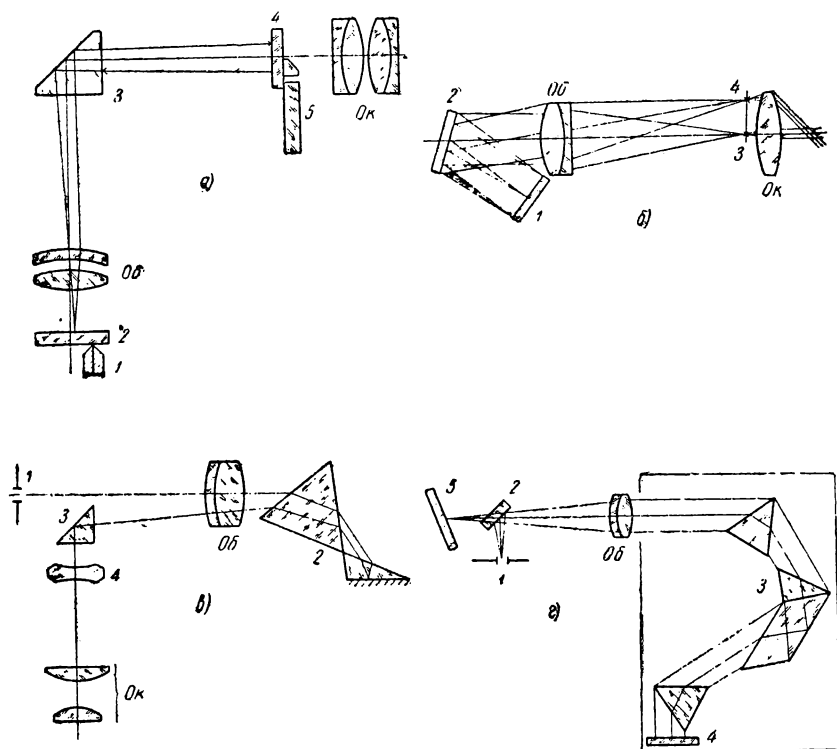


Рис. 125. Оптические системы автоколлимационных приборов: а — оптиметр; 1—измерительный штифт; 2—зеркало, 3—призма, 4—сетка, 5—осветительные призмы; б — гравитационный вариометр: 1—неподвижное зеркало, 2—вращающееся зеркало, 3—источник света, 4—изображение; в — стилоскоп НИИФ МГУ: 1—щель, 2—преломляющие призмы, 3—призма, 4—отрицательная линза; г — спектрограф Сейсса: 1—источник света, 2—полупосеребрянное зеркало, 3—спектральные призмы, 4—зеркало, 5—фотопластинка

превратить в автоколлимационный, придав ему осветительное устройство для освещения сетки. Наиболее употребительными являются системы с плоскопараллельной пластинкой, поставленной под углом 45° к оптической оси, и с призмой, вводимой в фокальную плоскость (система Гаусса).

Допустим, что плоскопараллельная пластинка расположена между окуляром и объективом, вблизи окуляра (рис. 126) 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 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 поле зрения от каких-либо посторонних устройств. Недостатком ее является слабая освещенность изображения. Для освещения используется только небольшая часть света, отраженного от полированной поверхности стекла.

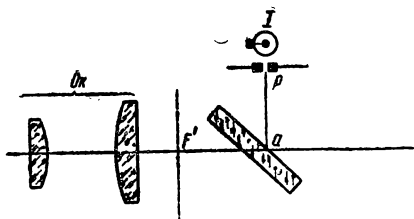


Рис. 126. Автоколлимационный окуляр с пластинкой

освещения используется только небольшая часть света, отраженного от полированной поверхности стекла.

Имеется возможность, закрыв часть поля зрения, в фокальную плоскость ввести узкую призму (рис. 127) 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.

Недостатки обоих этих автоколлимационных окуляров устранены в автоколлимационных окулярах В. П. Линника и А. Н. Захарьевского. В окуляре В. П. 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 А. Н. Захарьевского имеет две прямоугольные призмы (рис. 128) с углами 40° и 50° . 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 расстоянием и диаметром зрачка входа (световым от-

вертием). Объективы коллиматоров должны быть тщательно исправлены на сферическую и хроматическую aberrации. Эти aberrации нарушают параллельность выхода лучей из объектива. Чтобы избежать влияния сферической aberrации, 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 м. В приборах часто применяют объективы с фо-

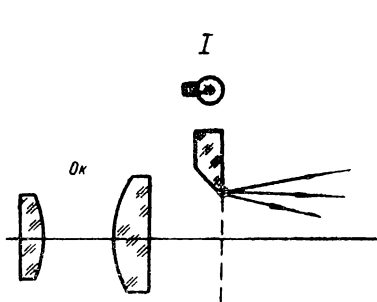


Рис. 127. Автоколлимационный окуляр с призмой

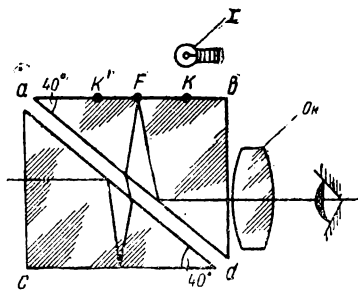


Рис. 128. Автоколлимационный окуляр Захарьевского

кусными 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 см² и для него необходим световой поток в 0,1 лм. Коэффициент светопропускания 0,78, а фокусное расстояние объектива коллиматора фотореле $f' = 90$ мм.

Решение. Определим необходимую освещенность фотоэлемента по формуле (38, 5), имея в виду, что $F = 0,1$ лм, а $S = 0,0004$ м²:

$$E' = \frac{F}{S} = 250 \text{ лк.}$$

Затем определим необходимый световой поток по формуле

(60,4), в которой полагаем $\sigma = l_0$, а $f' = 0,09$ м:

$$F_0 = \frac{4\pi f'^2 E'}{\tau} = 32,5 \text{ лм.}$$

Такой характеристике соответствует лампа для сигналов 6 в, 4 вт, имеющая световой поток 35 лм.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Тудоровский А. И. Теория оптических приборов. Изд-во АН СССР, т. I, 1948; т. II, 1952.
2. Фефилов Б. В. Прикладная оптика. Геодизиздат, 1957.

Дополнительная

К главе первой

3. Соболев С. П. Оптические инструменты и сведения о них в допетровской Руси. Тр. Ин-та истории естествознания АН СССР, т. III, 1949.
4. Ченекал В. П. Природа света в воззрениях русских естествоиспытателей XVII и начала XIX века. Тр. Ин-та истории естествознания АН СССР, т. III, 1949.
5. Лазарев П. П. Очерки истории русской науки. Изд-во АН СССР, 1950.
6. Вавилов С. И. Советская наука на новом этапе. Изд-во АН СССР, 1946.
7. Соболев С. П. История микроскопа и микроскопические исследования в России в XVIII веке. Изд-во АН СССР, 1949.
8. Материалы к докладам акад. С. И. Вавилова и акад. Д. С. Рождественского «О работах государственного оптического института». Изд-во АН СССР, 1936.
9. «XV лет Государственного оптического института». ГТТИ, 1936.

К главам второй — пятой

10. Слюсарев Г. Г. Геометрическая оптика. Изд-во АН СССР, 1946.
11. Чуриловский В. Н. и Турыгин И. А. Оптотехника. ВВА РККА, 1931.

К главе шестой

12. Кислов Н. М. Теория оптических инструментов, 1915.
13. Чуриловский В. Н. Расчет призматических систем. ВООМП, 1933.
14. Бегунов Б. Н. Схемы просчетов лучей. Редбюро ГУГСК, 1938.
15. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. ОНТИ, 1937.

К главе седьмой

16. Кравков С. В. Глаз и его работа. Изд-во АН СССР, 1950.
17. «Оптика в военном деле». Изд-во АН СССР, т. I, 1945; т. II, 1948.
18. Бардин А. Н. и Смирнов В. А. Конструкции оптических приборов. Кубуч, 1936.
19. Русинов М. М. Оптика аэрофотосъемочных приборов. ОНТИ, 1936.
20. Михель К. Основы теории микроскопа. ГИТТЛ, 1955.
21. Справочная книга «Оптика-механика». т. I. ОНТИ, 1936.

Оптические производства в России

Наименование	Годы		Руководитель	Примечание
	открытия	закрытия		
Дворцовая оптическая мастерская в Москве	Начало XVIII	1726	И. Е. Беляев	слилась с мастерской Академии наук
Оптическая мастерская Петербургской академии наук	1725	1805	И. И. Беляев	—
Класс математических инструментов Петербургской академии художеств	1767	1795	Шишорин	—
Оптическая мастерская при Государственной академической коллегии в Петербурге	1803	1818	Бабкин Шишорин	—
Оптическая мастерская Швабе в Москве	1840	1917	Швабе	после революции завод «Геофизика»
Оптическая мастерская Воткей в Петербурге	1848	1912	Воткей	—
Оптическое производство Урлауба в Петербурге	1877	1914	Урлауб	—
Фабрика оптических снарядов в Варшаве	1899	1911	Гинсберг	—
Оптическая мастерская Обуховского завода в Петербурге	1905	—	Гершун, Фрейберг, Перепелкин	после революции завод ЛОМЗ
Российское акционерное общество оптических и механических производств в Петербурге	1914	1917	Гершун	после революции завод ГОМЗ
Петербургский императорский фарфоровый завод (отдел оптического стекла)	1914	—	Качалов	после революции завод Лензос

Марка стекла	n_D	ν
ЛК2	1,4686	66,28
ЛК3	1,4874	70,03
К8	1,5163	64,06
БК10	1,5688	56,04
СТК1	1,7175	46,80
ТФ1	1,6475	33,86
ТФ2	1,6725	32,22
ТФ3	1,7172	29,50
ТФ4	1,7398	28,15
ТФ5	1,7550	27,52
ТФ6	1,9000	20,99
ТФ7	1,7280	28,33
ТФ8	1,6893	31,12
ТФ10	1,8060	25,36
СТФ1	2,0361	18,10

Таблица 3

Яркости источников света и рассеивающих поверхностей

Источник света	Яркость в нитах
Наименьшая различаемая яркость	10^{-6}
Ночное безлунное небо	10^{-4}
Лист белой бумаги ($E=30$ лк)	10
Экран в кинотеатре	5—100
Яркость на сцене театра	0,1—130
Небо в пасмурную погоду	1000
Ясное небо в 75° от солнца	1500
Поверхность луны	2500
Ясное небо	4000
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	$8 \cdot 10^8$
Матированная газополная 2000 <i>вт</i> лампа	$13 \cdot 10^8$
Нить вольфрамовой 40 <i>вт</i> лампы (пустотной)	$22 \cdot 10^8$
Кратер простой дуги	$1,4 \cdot 10^8$ — $1,6 \cdot 10^8$
Солнце	$1,5 \cdot 10^9$
Ртутные лампы сверхвысокого давления	$4 \cdot 10^8$ — $1,8 \cdot 10^9$

Окуляр	Фокусное расстояние f' , мм	Окулярное увеличение, Γ	Поле зрения, $2 \omega'$	Диаметр зрачка выхода D' , мм	Переднее вершинное фокусное расстояние S_F , мм	Положение зрачка выхода t мм
Симметричный	20	12,5	40°	4	14,9	15—24
То же	25	10,0	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	13,3	28—36
»	50	5,0	60°	12	18,6	35—45

Таблица 5

Ахроматические микрообъективы слабого увеличения

Объектив	Линейное увеличение, β	Апертура, A	Поле зрения $2 l$, мм	Рабочий отрезок S_1 , мм	Фокусные расстояния f' , мм	Длина тубуса, мм
ОМ-3	3,5	0,10	5,00	24,85	29,92	160
ОМ-12	3,7	0,11	4,80	27,73	33,10	160
ОМ-12М	4,7	0,11	3,80	25,90	33,10	190
ОМ-22	6,0	0,11	3,00	27,50	24,90	190
ОС-6	6,0	0,15	3,00	11,00	23,30	160
М-46	8,0	0,20	2,20	9,19	18,00	160
ОМ-2	9,0	0,20	0,90	13,84	15,50	160
—	10,0	0,25	2,00	6,50	15,30	160
ОМ-5	10,0	0,30	1,80	5,17	16,10	160
ОМ-18	10,0	0,30	1,80	7,77	15,50	160
ОМ-33-Л	10,0	0,40	1,80	3,45	15,98	160
ОХ-23	—	0,17	1,85	6,17	23,17	—
ОХ-14	—	0,30	1,80	5,71	13,89	—

Окуляры микроскопов

Окуляр	Окулярное увеличение, Γ	Фокусное расстояние f' , мм	Поле зрения $2l$, мм	Диаметр зрачка выхода D' , мм	Тип окуляра
АМ-25	3	83,0	24	5,0	Компенсационный
АМ-6 и АМ-30	4	62,0	24	3,6	Гюйгенса
АМ-12 и АМ-24	5	49,8	23	3,0	Компенсационный
М-7	7	36,0	18	2,0	Гюйгенса
АМ-13	7	35,0	18	2,1	Компенсационный
АШ-8	8	31,4	21	1,8	Широкоугольный
М-10	10	24,8	14	1,5	Гюйгенса
АМ-14	10	25,2	13	1,8	Компенсационный
М-11	15	17,0	8	1,0	Гюйгенса
АМ-27	15	16,8	11	1,5	Ортоскопический
АМ-16	20	12,6	9	1,1	Ортоскопический

Фотографические объективы для любительских фотокамер

Объектив	Фокусное расстояние f' , мм	Относительное отверстие	Поле зрения, 2ω	Разрешающая способность в центре, штр/мм
Мир-4	28	1:3,5	76°	—
Орион-15	28	1:6,0	76°	45
Ю-12	35	1:2,8	63°	34
И-60	35	1:2,8	50°	—
Мир-1	37	1:2,8	60°	45
Т-32	45	1:3,5	52°	—
Ю-8	50	1:2,0	45°	32
Меркурий-1	50	1:2,0	48°	—
И-10	50	1:3,5	48°	—
И-50	50	1:3,5	48°	38
Ю-3	52	1:1,5	45°	30
Ю-17	52	1:2,0	45°	28
И-26М	52	1:2,8	45°	25
И-22	52	1:3,5	45°	32
Гелиос-44	58	1:2,0	42°	35
Т-35	75	1:4,0	60°	—
Т-22	75	1:4,5	59°	—
И-29	80	1:2,8	56°	—
Гелиос-40	85	1:1,5	30°	32
Ю-9	85	1:2,0	29°	30
И-23	110	1:4,5	56°	28
И-24	110	1:3,5	56°	28
Ю-11	135	1:4,0	20°	24
Телемар-22	200	1:4,5	12,5°	38
Таир-3	300	1:4,5	8°	36

Аэрофотографические объективы

Объектив	Фокусное расстояние f' , мм	Относительное отверстие	Поле зрения, 2ω	Разрешающая способность в центре, штр/мм
Руссар-29	70	1:6,8	122°	31
В-1	100	1:6,3	86°	47
Руссар-33	100	1:7,8	130°	29
Орион ^{1а}	200	1:6,3	92°	33
И-51	210	1:4,5	56°	25
Уран-9	250	1:2,5	32°	40
И-13	300	1:4,5	46°	25
И-55	300	1:4,5	46°	—
Ф-3	400	1:4,5	31°	20
И-17	500	1:5,0	40°	28
И-52	500	1:5,0	40°	27
Телемар-2	750	1:6,3	32°	30
Телемар-7	1000	1:7,0	24°	30

Киносъёмочные объективы

Объектив	f' , мм	Относительное отверстие	Поле зрения, 2ω	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
Триар	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°	40	нормальная
ОКС1-20-1	20,0	1:2,8	35°	40	узкая
ОКС1-22-IV	22,1	1:2,8	63°	45	нормальная
РО-52-1	25,0	1:1,4	28°	40	узкая
ОКС1-25-1	25,2	1:2,5	28°	—	узкая
Ж-21М	27,8	1:2,0	56°	45	нормальная
ОКС128-IV	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-IV	35,1	1:2,0	46°	52	нормальная
ОКС2-40	40,0	1:3,5	69°	65	широкоформатная
ОКС1-40-IV	41,1	1:2,5	40°	60	нормальная
Таир-15	50,0	1:4,0	14°	—	узкая
РО-54-1	50,0	1:2,0	18°	—	узкая
ОКС1-50-1	50,3	1:2,0	30°	54	нормальная
Ж-23	50,6	1:2,0	33°	35	нормальная
ОКС1-56	56,0	1:3,0	52°	65	широкоформатная
ОКС1-75-IV	75,0	1:2,0	22°	50	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-IV	80,1	1:2,0	19°	50	нормальная
ОКС1-100-IV	100,1	1:2,0	16°	52	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°	30	нормальная

Таблица 10

Зеркально-линзовые объективы

Объектив	f' , мм	Относительное отверстие	Поле зрения, 2ω	Разрешающая способность в центре, штр/мм
ЗМ-30-1	300	1: 3,0	5°	40
МТО-350	350	1: 5,6	5°	
МТО-500	500	1: 8,0	5°	28
ЗМ-50-1	500	1: 5,6	3°	40
МТО-100-1	1000	1: 10,0	2,5°	28
ЗМ-100-1	1000	1: 6,8	1,5°	40

Таблица 11

Объективы для телевидения

Объектив	Фокусное расстояние f' , мм	Относительное отверстие	Поле изображения $2l'$, мм	Разрешающая способность, штр/мм	
				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-11Т	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 12

Репродукционные фотографические объективы

Объектив	Фокусное расстояние f' , мм	Относительное отверстие	Поле зрения, 2ω	Разрешающая способность в центре, штр/мм
Луч	180	1: 6,8	70°	21
Индустар-11	300	1: 9,0	45°	28
«	360	1: 9,0	45°	26
«	450	1: 9,0	45°	26
«	600	1: 9,0	37°	25
Полигмар	600	1: 10,0	45°	25
Индустар-11	750	1: 9,0	37°	24
Полигмар	900	1: 15,0	40°	30
Индустар-11	900	1: 9,0	33°	21
«	1200	1: 9,0	33°	19

Таблица 13

Проекционные объективы

Объектив	f' , мм	Относительное отверстие	Поле зрения, 2ω	Область применения
Полинар	300	1: 3,5	37°	эпипроекция
И-23 V	50	1: 3,5	48°	фотоувеличение
Орто-Ниар	105—180	1: 6,3—1: 7,7	62°	фотограмметрические проекторы
Луч	180	1: 6,8	70°	то же
РО-51	20	1: 2,8	41°	проектор контроля деталей
РО-61	28	1: 2,5	56°	то же
РО-59	50	1: 2,0	34°	»
РО-110	35	1: 1,2	20°	узкоплочная проекция
РО-109	50	1: 1,2	14°	то же
РО-111	65	1: 1,4	11°	»
РО-108	90	1: 2,0	17°	нормальная проекция
РО-107	140	1: 2,2	11°	то же
РО-800	150	1: 2,0	10°	стереопроекция

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Аббе автоколлимационный окуляр	242	Вавилов С. И.	10
— закон синусов	122	Визуальная коррекция	137
— нулевой инвариант	33	— система	116
— призма	177	Виньетирование	90
Аберрация	114	Внемеридиональный луч	126
Абсолютный показатель преломления	20	Волосов Д. С.	220
— порог зрения	166	Вторичный спектр	136
Автоколлимационный окуляр	242	Входной зрачок	90
Адаптация	165	— микроскопа	200
Аккомодация	165	— Кеплера	190
Активная коррекция	137	Выходной зрачок	90
Анаморфозы коэффициент	52; 83	— зрительной трубы	190
Анаморфозная система	82	— микроскопа	201
Анастигмат	129	Гальперин Д. Ю.	220
Апертура	201	Гельмгольца—Гюйгенса уравнение	37
Апертурная диафрагма	88	Гершун А. Л.	246
Апертурный угол	90	Гинан П.	9
Апланат	123	Гинсберг	245
Апланатизм	122	Главная плоскость	58
Апохромат	136	Главные точки линзы	75
Астигматизм	127	— системы	57
— плоскопараллельной пластинки	47	— сложной	64; 72
Астигматическая разность	128	Главный луч	88
Астигматический пучок	17	Глаз	164
Афокальная цилиндрическая приставка	83; 85	— недостатки	168
Ахроматический объектив	135; 147	Глубина изображаемого пространства	109
Базис глазной	167	— резкости	112
Бека осветительная система микроскопа	205	Гомоцентрический пучок	16
Бинокль призмный	176; 193	Гребенщиков И. В.	97
Биноклярное зрение	167	Дальнозорский глаз	167
Ближняя точка ясного зрения	165	Дальняя точка ясного зрения	165
Близорукий глаз	167	Дахпризмы	175
		Диаскопическая проекция	229

Диафрагма апертурная или действующая	88	Коллектив	180
— полевая или поля зрения	91	Коллектив окуляра	185
Диафрагменное число	105	Коллиматор	235
Диоптрия	70	Кома	123
Дисперсия	23	— меридиональная	123
Дисторсия абсолютная или оптическая	130	Конденсор	221
— фотограмметрическая	131	Конденсоры микроскопов	205
Единицы светотехнические	100	Концентрическая линза	78
Естественная перспектива	95	Косые лучи (внемеридиональные лучи)	126
Желтое пятно	164	Королев Ф. А.	12
Заднее фокусное расстояние	58	Конъюктива	164
Закон косинусов для освещенности поверхности	101	Коэффициент анаморфозы (трансформирования)	52; 83
— независимости распространения лучей	19	— виньетирования	94
— преломления	20	— дисперсии	25
— прямолинейного распространения света	19	— отражения	96
— синусов Аббе	122	— поглощения	95
Зеркало параболическое	228	— призмы	173
— плоское	171	— прозрачности	96
— эллиптическое	229	— светопропускания	95; 212
Зеркальная система	218	— телеобъектива	216
Зеркально-линзовая система	220	Кретьен	83
Зрачок глаза	163; 165	Кривизна поверхности изображения	38; 129
Зрение одним глазом	167	Критический угол призмы	22
— стереоскопическое	167	Кружок рассеяния	114; 119
Зрительная труба Галилея	190	Лагранжа—Гельмгольца уравнение	40
— Кеплера	190	Лазарев П. П.	10
Зрительный пурпур	165	Ландсберг Г. С.	12
Идеальная оптическая система	56	Лебедев А. А.	12
Изображение	17	Лебедев П. Н.	10
— действительное	17	Левшин В. П.	12
— мнимое	16	Лиготцкого—Штебле условие изопланатизма	123
Изопланатизм	123	Линза	76
Иммерсия	202	— бесконечно тонкая	59; 65
Инвариант нулевой	33	— гиперболическая	78
Индустар	213	— гиперхроматическая	140
Исправление недостатков глаза	168	— концентрическая	78
Источник света	223; 236; 244	— мениск	76
Каустика поверхность	18; 223	— шар	77
Качалов Н. Н.	12	— цилиндрическая	18
Качество изображения	117	— эллиптическая	79
Келера осветительное устройство	203	Линник В. П.	13; 242
Кинопроекция	230	Лобачевский Н. И.	10
Колбочки	163	Лодыгин А. Н.	10
		Ломоносов М. В.	9
		Лула	197
		Лупы поля зрения	199
		— увеличения	198
		Любимов Н. А.	10
		Люкс	101

Люмен	101	— система	27
Люмен на квадратный метр	103	Оптические постоянные стекла	247
Липперсгей	8	Оптический метод трансформирования	86
Максимович С. О.	86	Орто-Ниар	128
Максутов Д. Д.	214	Ортоскопическая система	130
Малафеев О. Н.	10; 176	Осветительная система Бека	205
Масштаб изображения	95; 210	— Келера	203
Мениск	76	Освещенности единица	101
Меридиональная плоскость	46; 115	Освещенность	101
Меридиональные лучи	115	— изображения	104
Миопический глаз	167	Острота зрения	166
Микроскоп	200	— стереоскопического	167
Микроскопа осветитель	203	Относительное отверстие	105
Мнимое изображение	17	Отражения законы	20
Наилучшего зрения расстояние	165	Палочки	163
Наименьшее разрешаемое расстояние	146	Параксиальные лучи	28
Несферические поверхности	53	Переднее фокусное расстояние	58
Нит	102	Перепелкин Я. Н.	246
Нулевой инвариант Аббе	33	Петрушевский Ф. Ф.	10
Нулевые лучи	28	Печатникова Ш. Я.	220
Ньютон И.	8	Плоская поверхность	43
Ньютона формула	59	Плоскопараллельная пластинка	44
Оборачивающие линзовые системы	193	Плоскость главная	57
Оборачивающие призменные системы	176	— изображения	38
Обреимов И. В.	12	— предметов	38
Объективы апохроматы	136	Показатель преломления абсолютный	20
— ахроматы	135	— относительный	20
— зрительной трубы	179	Поле зрения	107
— кинопроекторные	234	— зрительной трубы	192
— киносъемочные	252	— лупы	199
— микроскопов	207; 248	— микроскопа	201
Окуляр автоколлимационный		— фотообъектива	211
Гаусса	241	Полезное увеличение зрительной трубы	141
— Гюйгенса	186	— микроскопа	202
— зрительной трубы	186	Полное внутреннее отражение	22
— Кельнера	186	Поперечная сферическая аберрация	120
— компенсационный	208	Порро система	176
— микроскопа	249	Постоянные оптических стекол	247
— ортоскопический	186	Потери света на отражение	96
— Рамсдена	187	— поглощение	96
— симметричный	186	Правило знаков	29
— с удаленным зрачком	186	Предводителей А. С.	11
— широкоугольный	186	Предельный угол полного внутреннего отражения	22
— Эрфле	186	Преломляющий угол клина	51
Окулярное увеличение	198	Призма Аббе	177
Опак иллюминатор	204	— башмачная	177
оптическая коррекция	137	— дальномерная	177
— ось	28	— Дове	173
— сила	70	— куб	177

— крышеобразная	175	Склера	163
— Пента	174	Слепое пятно	163
— Пехана	177	Слюсарев Г Г	149
— полупента	175	Сопряженные точки, линии, плоскости	56
— Шмидта	174	Сосудистая оболочка	163
Продольная сферическая абер- рация	119	Спектральная чувствительность	166
Продольное увеличение	61	Спектр вторичный	136
Проекционная система	116	Спектроскоп автоколлимацион- ный	241
Проекционное расстояние	231	Стерадан	101
— объективы	234	Стереоскопический параллакс	167
Проекционный прибор диаскоп	230	Стереоскопическое зрение	167
— эпидиаскоп	232	Стигматическое изображение	17
— эпископ	230	Стильб	102
Просветление	97	Столетов А. Г.	10
Прямоугольная призма	172	Сферическая аберрация	119; 224
Пучок лучей	16	Схемы вычисления лучей	159—161
Радужная оболочка	163	Телеобъектив	216
Разрешаемое расстояние	146	Телескопическая линза	78
Разрешающая способность глаза	166	Телескопическая система	189
— зрительной трубы	141	Телемар	217
— объектива	141	Телесный угол	100
— микроскопа	146	Темновой порог раздражения	166
— фотообъектива	211	Тессар	213
Ракурсный метод трансформи- рования	86	Тип объектива	213
Рамсдена окуляр	187	Тонкая линза	59; 65
Редуцирование	169	Торическая поверхность	27
Ретина	163	Точечное изображение	17
Роговая оболочка	163	Трансформирования	
Рождественский Д. С.	10	коэффициент	83
Русинов М. М.	93; 107	Труба зрительная	190; 192; 194
Руссар	93; 107	Тубуса микроскопа механиче- ская длина	203
Сагиттальная плоскость	46; 115	Тудоровский А. И.	11; 13
Сагиттальные лучи	115	Увеличение видимое	94
Светность	102	— зрительной трубы	191
Световая чувствительность гла- за	166	— линейное	40
Световой поток	100	— луны	198
— луч	16	— микроскопа	200
Светосила геометрическая	105	— окулярное	198
— физическая	105	— полезное	141; 202
Светосильные объективы	211	— поперечное	41
Светящаяся точка	16	— продольное	61
Свеча	100	— угловое	42
Сетка	235	Угол отклонения	51
Сетчатая оболочка	163	— охвата	221
Сила света	100	— поля зрения	91
Симметричный окуляр	186	— изображения	91
Система круговой симметрии	41	— сходимости	222
— оптическая	27	Узловые точки	59
— телескопическая	189	Уравнение углов нулевого луча	34
— центрированная	28		

Фабрикант В. А.	12	Число Аббе	25
Фокальная плоскость	58	Числовая апертура	201
Фокометр	64	Чувствительность глаза	166
Фокус системы второй (задний)	56	Шателен М. А.	11
— первый (передний)	56	Широкоугольные объективы	211
Фокусные расстояния	33; 58	Широкоугольный окуляр	186
Формула отрезков	60	Шмидта призма	174
Фотографическая система	116	Штебле—Лигоцкого условия	122
— коррекция	137	Эйлер	9
Фракосторо	8	Эллиптическая линза	79
Фрейберг С. И.	246	Эллиптическое зеркало	229
Фут-свеча	101	Эпидиаскоп	232
Хроматизм положения	134	Эпипроекция	229
— увеличения	137	Эпископ	230
Хроматическая aberrация	134	Эрфле окуляр	186
— разность сферических aberrаций	136	Яблочков А. Н.	10
— призмы	52	Яркость	101
Хрусталик глаза	163	— единица	102
Центрированная система	28	— изображения	102
Цилиндрическая линза	18		

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Глава первая. ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Значение и роль оптических приборов	5
§ 2. Краткий исторический очерк развития оптических приборов	8
§ 3. Предмет геометрической оптики	14

Глава вторая. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

§ 4. Светящаяся точка, световые лучи и пучки	16
§ 5. Законы, лежащие в основе геометрической оптики	19
§ 6. Полное внутреннее отражение	22
§ 7. Дисперсия света	23

Глава третья. ОБРАЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

§ 8. Преломляющие и отражающие поверхности	26
§ 9. Система поверхностей и нулевые лучи	27
§ 10. Правило знаков	29
§ 11. Преломление луча сферической поверхностью	30
§ 12. Уравнение Гюйгенса — Гельмгольца	37
§ 13. Линейное увеличение	40
§ 14. Угловое увеличение	42
§ 15. Преломление луча плоской поверхностью	42
§ 16. Преломление луча через плоскопараллельную пластину	44
§ 17. Астигматизм пластины	46
§ 18. Преломление луча через клин	51
§ 19. Преломление луча несферической поверхностью	52

Глава четвертая. ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

§ 20. Идеальная оптическая система	55
§ 21. Главные точки и фокусные расстояния	56
§ 22. Зависимости между положениями предметов и их изображений	59
§ 23. Продольное увеличение	61
§ 24. Формула фокусного расстояния	63
§ 25. Тонкая линза и система тонких линз	65
§ 26. Оптическая сила системы	70
§ 27. Формула углов	70

§ 28. Оптическая сила двух систем	72
§ 29. Толстая линза	73
§ 30. Типы линз	76
§ 31. Наклонные плоскости предметов и изображений	79
§ 32. Анаморфозные системы	81

Глава пятая. ОБЩИЕ СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

§ 33. Основные характеристики оптического прибора	87
§ 34. Диафрагмы и их значения	87
§ 35. Виньетирование	91
§ 36. Видимое увеличение	94
§ 37. Потери света	95
§ 38. Основные фотометрические понятия	100
§ 39. Светосила	103
§ 40. Освещенность по полю изображения	105
§ 41. Поле зрения	107
§ 42. Глубина изображаемого пространства	109
§ 43. Глубина резкости	112

Глава шестая. КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

§ 44. Роль аберраций в образовании изображений	114
§ 45. Сферическая аберрация	118
§ 46. Отступление от закона синусов	122
§ 47. Кома	123
§ 48. Астигматизм	127
§ 49. Дисторсия	130
§ 50. Хроматическая аберрация	134
§ 51. Разрешающая способность	140
§ 52. Вычисление двухлинзового склеенного объектива	146

Глава седьмая. ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПРИБОРОВ

§ 53. Глаз	163
§ 54. Оптические детали	168
§ 55. Телескопические системы	189
§ 56. Лупа и микроскоп	197
§ 57. Фотографический объектив	209
§ 58. Осветительные системы.	221
§ 59. Проекционные системы	229
§ 60. Коллиматоры и автоколлиматоры	235
Рекомендуемая литература	245
Таблицы	247
Алфавитный указатель	257



БОРИС НИКОЛАЕВИЧ БЕГУНОВ
ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Редактор *Л. Ф. Верес*

Технический редактор *Л. В. Лазарева*

Сдано в набор 7/XII 1960 г.

Подписано к печати 13/XII 1961 г.

Л-28409 Формат 60×90¹/₁₆.

Печ. л. 16,5

Уч.-изд. л. 14,09

Изд. № 1426.

Заказ № 1837.

Тираж 6000.

Цена 65 коп.

Издательство Московского университета
Москва, Ленинские горы, Административный корпус
Типография Изд-ва МГУ. Москва, Ленинские горы

Замеченные опечатки

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
40	В формуле (13,1)	$\beta = \frac{l'}{l}$	$\beta = \frac{l'}{l}$
81	В формуле (31,3)	$\beta_{\min} = \frac{a_1}{a_1}$	$\beta_{\min} = \frac{a_1}{a_1}$
81	В формуле (31,4)	$\beta_{\max} = \frac{a_2}{a_2}$	$\beta_{\max} = \frac{a_2}{a_2}$
147	Рис. 72	$\nu_1 = 1; \nu_4 = 1$	$\nu_1 = \infty; \nu_4 = \infty$
160	1 снизу	$\frac{h_1 = r_1}{n_2}$	$\frac{h_1 = r_2}{h_2}$
	1 снизу	3,85	0,85
213	15 сверху	0,25 мм	0,05 мм