

ОГЛАВЛЕНИЕ

Коллектив авторов	5
Предисловие.....	6
Список сокращений и условных обозначений....	7
Введение	8
Глава 1. Геометрическая оптика	
(Мягков Александр Владимирович)	9
1.1. Основные понятия и законы геометрической оптики	9
1.2. Линзы. Простые оптические системы....	12
1.3. Сложные оптические системы.	
Оптическая система глаза.....	20
1.4. Аберрации оптических систем	23
1.5. Простые и сложные оптические системы.	
Теория и расчет оптических систем	26
Контрольные вопросы	33
Литература	34
Глава 2. Физиологическая оптика	
(Мягков Александр Владимирович)	35
2.1. Зрительные функции	35
2.2. Физическая рефракция	41
2.3. Клиническая рефракция	42
2.4. Аккомодация.....	46
2.5. Бинокулярное зрение	51
Контрольные вопросы	56
Литература	56
Глава 3. Прикладная оптика	
(Керник Наталия Юрьевна)	57
3.1. Технология изготовления очковых линз ..	57
3.2. Технология изготовления оправ для очков.....	72
3.3. Технология изготовления очков	80
Контрольные вопросы	93
Литература	93
Глава 4. Клиническая оптика	
(Мягков Александр Владимирович, Бекетова Ольга Алексеевна)	94
4.1. Анатомия и физиология органа зрения ..	94
4.2. Клинические методы исследования органа зрения.....	109
4.3. Последовательность (алгоритм) общего исследования органа зрения.....	127
4.4. Нарушение прозрачности оптических сред.....	128
4.5. Патология сетчатки и зрительного нерва.....	132
4.6. Патология внутриглазного давления ..	136
4.7. Неотложная помощь в офтальмологии на догоспитальном этапе.....	136
4.8. Первая доврачебная помощь при неотложных состояниях	140
Ситуационные задачи	141
Контрольные вопросы	142
Литература	143
Глава 5. Диагностика и оптическая коррекция рефракционных нарушений	
(Мягков Александр Владимирович, Бекетова Ольга Алексеевна)	145
5.1. Зрительные расстройства. Методы диагностики	145
5.2. Аметропии. Диагностика и принципы оптической коррекции.....	150
5.3. Астигматизм. Виды, диагностика, принципы коррекции	187
5.4. Аккомодационные нарушения	190
5.5. Нарушения бинокулярного зрения	199
5.6. Анизометропия, амблиопия и анизейкония	210
5.7. Афакия и артифакция	211
5.8. Оптическая коррекция нерегулярной роговицы. Кератоконус	212
Контрольные вопросы	213
Литература	215
Глава 6. Контактная коррекция зрения	
(Мягков Александр Владимирович)	217
6.1. Краткий исторический экскурс	217
6.2. Материалы и технологии изготовления контактных линз	218
6.3. Методы подбора контактных линз различных конструкций	222
6.4. Техника подбора мягких контактных линз	224
6.5. Общие принципы ухода за контактными линзами	236
Контрольные вопросы	238
Литература	238
Глава 7. Общие вопросы фармакологии и фармакотерапии	
(Ставицкая Татьяна Васильевна)	239
7.1. Классификация глазных лекарственных средств, используемых в офтальмологии....	241
7.2. Противомикробные и противовирусные средства	241
7.3. Противовоспалительные и противоаллергические препараты.....	247

4 Оглавление

7.4. Препараты, улучшающие метаболические процессы и стимулирующие регенерацию роговицы	249
7.5. Препараты для лечения синдрома «сухого глаза»	250
7.6. Лекарственные средства, применяемые при проведении офтальмологического обследования	253
7.7. Препараты для лечения глаукомы и катаракты	255
7.8. Средства для профилактики и лечения возрастной макулярной дегенерации	259
Контрольные вопросы	260
Литература	261
Глава 8. Коммуникационно-маркетинговая деятельность при работе и реализации средств коррекции зрения (Якутина Елена Николаевна)	262
8.1. Маркетинг и маркетинговые коммуникации в оптике	262
8.2. Цифровизация оптического бизнеса	267
8.3. Формирование коммуникационной политики	270
8.4. Медиаплан как комплексный документ	271
8.5. Заключение	273
Контрольные вопросы	273
Практическое задание	273
Литература	273
Глава 9. Правовые аспекты ведения медицинской деятельности по специальности медицинская оптика (Пушкина Оксана Викторовна)	274
9.1. Основы законодательства об охране здоровья граждан Российской Федерации	274
9.2. Основы законодательства о санитарно-эпидемиологическом благополучии населения	275
9.3. Основы трудового законодательства	276
9.4. Основы законодательства Российской Федерации о защите персональных данных пациентов и сведений, составляющих врачебную тайну	276
9.5. Соблюдение правил оказания медицинских услуг	278
9.6. Соблюдение лицензионных требований, требований Роспотребнадзора, пожарного надзора, Росздравнадзора	279
9.7. Ответственность за нарушение законодательства	281
9.8. Требования к обеспечению внутреннего контроля качества и безопасности медицинской деятельности	282
9.9. Ведение медицинской документации, в том числе в форме электронного документа (медицинской карты пациента, информированного добровольного согласия, договора на оказание платных медицинских услуг)	284
9.10. Организация и проведение внутреннего контроля качества и безопасности медицинской деятельности. Оформление результатов проведения мероприятий внутреннего контроля качества и безопасности медицинской деятельности	286
9.11. Должностные обязанности работников, находящихся в распоряжении персонала	288
9.12. Использование информационных систем в сфере здравоохранения и информационно-телекоммуникационной сети интернет	289
9.13. Использование в работе персональных данных пациентов и сведений, составляющих врачебную тайну	291
9.14. Расчет образования отходов медицинских организаций и необходимое количество оборудования, инвентаря и расходных материалов при обращении с медицинскими отходами	292
Предметный указатель	294

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебник «Медицинская оптика», который мы представляем вам, стал результатом совместной работы целой команды энтузиастов под чутким руководством профессора Александра Владимировича Мягкова. Оптометрия хотя и относительно новое направление в российской офтальмологии, но уже успела завоевать признание благодаря усилиям выдающегося ученого и педагога профессора Юрия Захаровича Розенблюма. Именно он заложил основы этой науки, создав в 1991 г. фундаментальную монографию «Оптометрия». Этот труд выдержал множество переизданий и до сих пор остается актуальным, вдохновляя новые поколения офтальмологов и медицинских оптиков-оптометристов.

Наиболее активно медицинская оптика и оптометрия развиваются последние два десятилетия. За этот период разработаны профессиональный стандарт «Специалист в области медицинской оптики и оптометрии» и ФГОС СПО по специальности «Медицинская оптика». Именно поэтому возникла потребность в новом учебном издании, которое

должно содержать основные требования образовательного стандарта.

Каждый из авторов, будучи экспертом в своей области, в доступной форме изложил свой раздел, органично вписав его в общую структуру учебника, задуманную редактором — профессором А.В. Мягковым. Последовательное изложение материала от основ геометрической оптики до правовых вопросов позволит студенту среднего профессионального образования и слушателю курсов повышения квалификации структурировать свои знания и активно применять их на практике.

Лучшей оценкой для коллектива авторов служат отзывы и пожелания читателей, которые позволятнести необходимые корректизы в следующих изданиях.

*Татьяна Вячеславовна Порученкова,
директор АНО «Академия медицинской
оптики и оптометрии»*

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий учебник предназначен для студентов, осваивающих программу среднего профессионального образования по специальности 31.02.04. Медицинская оптика, согласно утвержденному Федеральному государственному образовательному стандарту (приказ Минпросвещения России от 21.07.2022 № 588). Данное издание стало первым полноценным учебником, который включает все разделы образовательного стандарта и соответствует Профессиональному стандарту специалиста в области медицинской оптики и оптометрии, утвержденному приказом Министерства труда и социальной защиты РФ от 31.05.2021 № 347н.

Основная цель учебника для студентов средних профессиональных учебных заведений — дать основные сведения об оптометрии и медицинской оптике для получения знаний и соответствующих компетенций, необходимых в практической деятельности медицинского оптика-оптометриста. Структура учебника позволяет студенту последовательно освоить все разделы дисциплины и включает как теоретические, так и практические аспекты. Геометрическая и физическая оптика рассматривает основные законы геометрической оптики и соотносит их с физиологией оптической системы глаза, дает понятие о соразмерной рефракции и аметропиях, освещает аккомодацию и бинокулярные функции.

Прикладная оптика представляет собой своеобразный мост, связывающий физиологическую и клиническую оптику, знакомит с современными технологиями изготовления очковых линз, оправ и сборки очков для коррекции рефракционных нарушений. Понимание технологических процессов служит основой правильного выбора того или иного вида очковой коррекции с учетом требований или предпочтений пациента.

Современный оптометрист не только выполняет функции медицинского оптика, но и решает задачи по выявлению социально значимых заболеваний глаз, таких как прогрессирующая миопия, катаракта, глаукома и др. Он должен уметь оказывать первую помощь при глазных заболеваниях на доврачебном этапе и, безусловно, как любой медицинский

работник, первую доврачебную помощь при общих неотложных состояниях. Необходимые знания для этого студент может почерпнуть в главе «Клиническая оптика».

Однако основная трудовая функция оптометриста — диагностика и оптическая коррекция выявленных рефракционных нарушений. Наряду с очковой коррекцией в учебнике впервые описана контактная коррекция зрения. Это позволит оптометристу рекомендовать альтернативные методы оптической коррекции аметропий и других рефракционных нарушений.

Не менее важны знания по фармакологии и фармакотерапии глазных заболеваний. Применение тех или иных лекарственных средств либо изделий медицинского назначения может быть противопоказанием для использования отдельных оптических методов коррекции или стать причиной нарушения зрительных функций. Знание особенностей действия глазных форм будет способствовать наиболее полному сбору анамнеза и своевременной профилактике глазных осложнений.

Большое значение при подборе средств коррекции имеют правильно выстроенные коммуникации между оптометристом и пациентом, оптометристом и работодателем. Оптометрист как медицинский работник обязан исполнять соответствующие законы и распоряжения профильных ведомств Российской Федерации. Основные законодательные акты подробно описаны в соответствующей главе.

Коллектив авторов стремился изложить материалы, описанные в учебнике, используя отечественный, зарубежный и собственный многолетний опыт, и выражает надежду, что это позволит молодым специалистам иметь достаточные знания для старта профессиональной карьеры.

При создании учебника были использованы материалы, ранее опубликованные в классических руководствах по офтальмологии и оптометрии, учебниках, отечественной и зарубежной периодической печати. Наряду с оригинальными рисунками и схемами были использованы рисунки и фотографии из открытых источников.

ГЛАВА 1

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Мягков Александр Владимирович

1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Понятие «оптика» можно рассмотреть с нескольких позиций. Во-первых, оптика — раздел физики, который изучает природу оптического излучения (света), его распространение и явления, наблюдаемые при взаимодействии света и вещества. С другой стороны, оптика изучает физические явления, связанные с распространением коротких электромагнитных волн. В-третьих, оптику можно рассматривать как часть общего учения об электромагнитном поле, поскольку оптическое излучение представляет собой электромагнитные волны. В итоге оптику можно охарактеризовать как учение о природе света, световых явлений и взаимодействии света с веществами.

Одна из первых теорий света — теория зрительных лучей — была выдвинута греческим философом Платоном около 400 г. до н.э. Данная теория предполагала, что из глаза исходят лучи, которые, встречаясь с предметами, освещают их и создают видимость окружающего мира. Взгляды Платона поддерживали многие ученые древности и, в частности, Евклид (III век до н.э.), который, исходя из теории зрительных лучей, основал учение о прямолинейности распространения света и сформулировал закон отражения. В те же годы были открыты следующие явления и законы:

- закон прямолинейного распространения света;
- законы отражения и преломления света;
- фокусирующее действие вогнутого зеркала.

Древние греки положили начало разделу оптики, получившему название «Геометрическая оптика».

Свет представляет собой сплошное физическое явление: с одной стороны, это электромагнитная волна, с другой стороны, свет ведет себя как поток фотонов (особых частиц — квантов). Сплошная среда — это явление, когда среда представлена большим количеством атомов или частиц, в данном случае — квантов, расположенных настолько близко, что невозможно определить структуру среды, то есть дискретность. Траектория распространения света, проходящего через однородную оптическую среду, всегда прямолинейна. Свет в природе распространяется в виде волн, но схематично его часто представляют в виде прямой линии или луча. *Световой луч* — прямая линия, которая в каждой точке перпендикулярна волновому фронту, проходящему через эту точку (рис. 1.1).

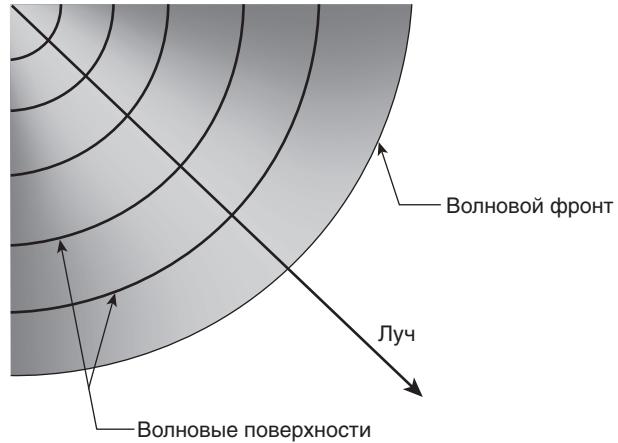


Рис. 1.1. Схематичное изображение светового луча и волнового фронта

Распространение световых волн представляет собой прохождение энергии через среду. Сама среда не движется, но образующие ее частицы колеблются перпендикулярно направлению распространения волны.

Возникновение термина «световой луч» связано с основным источником света в природе — Солнцем. **Световой луч** — линия, вдоль которой распространяется энергия световых электромагнитных волн. Направление светового луча совпадает с направлением распространения света. Световая точка — источник света, не имеющий размеров. Световой пучок — несколько световых лучей. Световые пучки могут быть гомоцентрическими и негомоцентрическими (рис. 1.2). В гомоцентрическом пучке лучи пересекаются в одной точке (O) и могут быть расходящимися, сходящимися и параллельными (см. рис. 1.2, а–в). Параллельный гомоцентрический пучок также имеет центр, который находится в бесконечности. В природе существуют расходящиеся и параллельные гомоцентрические пучки, а вот сходящихся нет. В негомоцентрическом пучке лучи пересекаются в нескольких точках, например O₁ и O₂ (см. рис. 1.2, г).

Световая волна характеризуется длиной и амплитудой (рис. 1.3). Длину волны λ определяют как расстояние между двумя симметричными участками волнового движения. Одно полное колебание, называемое периодом (T), занимает одну длину волны, обозначаемую λ . Амплитуда (A) — наибольшее смещение воображаемой точки волны от основной линии (t) направления движения волны. Любой участок периода называют фазой. Если две волны равной длины (но не обязательно равной амплитуды) распространяются в одном направлении,

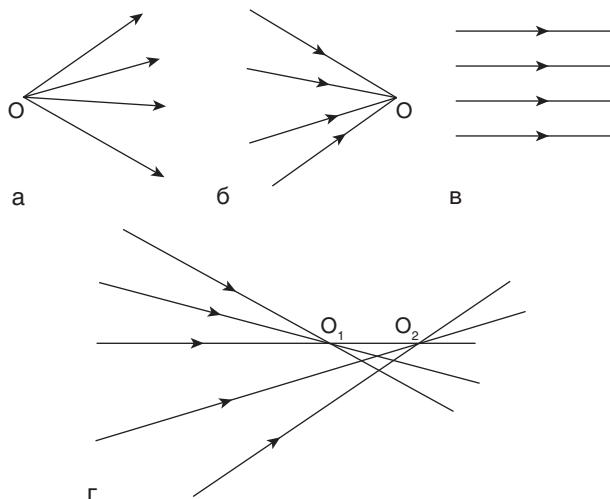


Рис. 1.2. Гомоцентрические и негомоцентрические световые пучки: а — расходящийся; б — сходящийся; в — параллельный; г — негомоцентрический

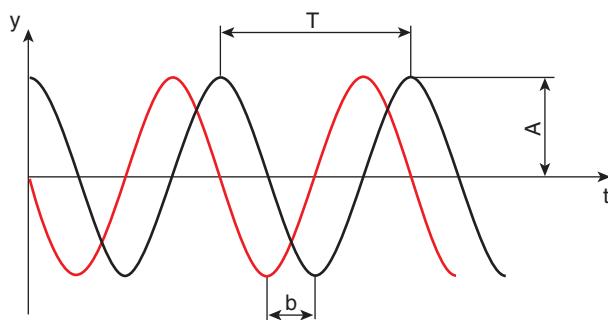


Рис. 1.3. Световая волна: А — амплитуда; Т — период; б — разность фаз; т — основная линия направления движения волн

но не совпадают по фазе, то доля периода или длины волны, на которую одна волна обгоняет другую, называют разностью фаз — отрезок b .

Световые волны с несовпадающей фазой называют **некогерентными**, а совпадающие по фазе — **когерентными**.

Две световые волны, имеющие одну и ту же траекторию, могут сопровождаться эффектами, которые зависят от того, находятся эти волны в одной фазе или нет. Взаимное увеличение или уменьшение результирующей амплитуды двух или нескольких волн при наложении друг на друга называются **интерференцией**. Результат интерференции зависит от разности фаз накладывающихся волн. Если они в фазе, то результирующая волна будет суммой этих двух волн, что именуют **конструктивной интерференцией** (рис. 1.4, а). Если две волны равной амплитуды сдвинуты по фазе на половину периода, они погасят друг друга — **деструктивная интерференция** (рис. 1.4, б). Конечный эффект в каждом случае таков, как если бы волны были наложены друг на друга и суммированы алгебраически.

Эффект деструктивной интерференции обеспечивает светопропускание роговицы. Коллагеновые волокна в строме роговицы расположены таким образом, что всякий отклоненный ими свет подавляется

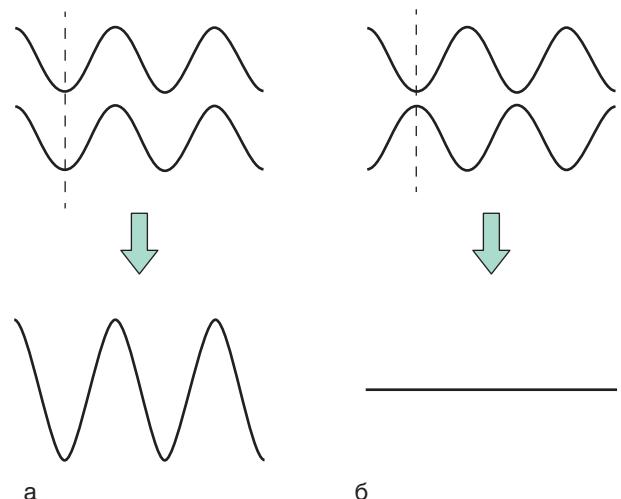


Рис. 1.4. Интерференция света: а — конструктивная интерференция; б — деструктивная интерференция

вследствие деструктивной интерференции. Деструктивную интерференцию используют и в оптике при нанесении просветляющих покрытий на очковые линзы. Покрытие состоит из нескольких тонких слоев прозрачного материала определенной толщины. Лучи света, отраженные от передней и задней поверхности каждого слоя просветляющего покрытия, взаимно нейтрализуют друг друга вследствие деструктивной интерференции, делая оптику более прозрачной.

Говоря о свете, мы всегда подразумеваем **видимый свет**, то есть электромагнитные волны в узком частотном диапазоне с длиной волны в промежутке от 380 до 780 нм (нанометр, 10^{-9} метра), непосредственно воспринимаемые человеческим глазом. С точки зрения электродинамики Максвелла распространение света ничем не отличается от распространения других электромагнитных излучений — радиоволн, инфракрасного, ультрафиолетового (УФ), рентгеновского и γ -излучения.

Видимый свет — электромагнитные волны с частотой и длиной, которые определяют его цвет. Люди и животные видят большой спектр электромагнитного излучения (рис. 1.5). Большинство людей и животных воспринимают видимый свет, а некоторые животные — еще и УФ (например, пчёлы и некоторые птицы) и инфракрасные лучи.

Оптическое излучение расположено в электромагнитном спектре между рентгеновским и микроволновым излучениями. Оптическое излучение подразделяют на диапазоны (области), которые объединяют длины волн, вызывающие сходные биологические реакции. Чем короче длина волн спектра, тем больше энергия фотонов, которая влияет на характер и интенсивность первичных фотобиологических реакций.

Выделяют следующие области оптического излучения:

- УФ-область С — 200–280 нм;
- УФ-область В — 280–315 нм;
- УФ-область А — 315–380 нм;

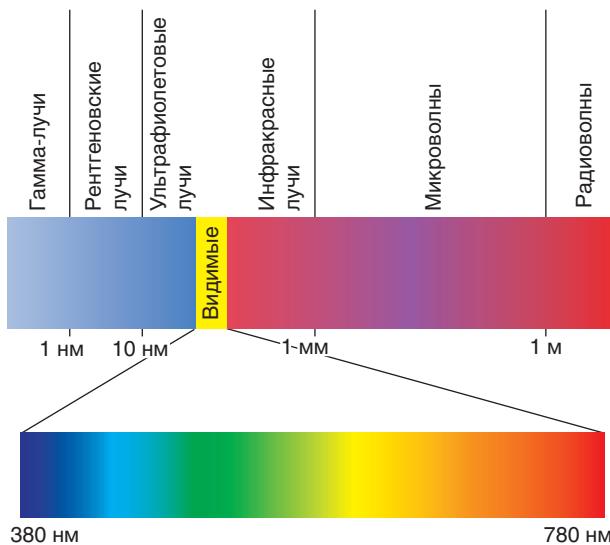


Рис. 1.5. Электромагнитный спектр

- видимое излучение — 380–780 нм;
- инфракрасная область А — 780–1400 нм;
- инфракрасная область В — 1400–3000 нм;
- инфракрасная область С — 3000–10 000 нм.

Роговица и скlera глаза поглощают все попадающие на них части оптического излучения, как очень коротких длин волн в УФ-области, так и очень длинных волн в инфракрасной области. Излучение УФ-области А почти полностью поглощается хрусталиком, в то время как видимый свет и ближнее инфракрасное излучение проходят через среды глаза и попадают на сетчатку. Волны видимого света стимулируют фоторецепторы сетчатки, вызывая ощущение света, а инфракрасное излучение вызывает повышение температуры тканей. Другие виды излучений, кроме видимых, могут оказывать негативное влияние на зрительный анализатор и окружающие ткани.

Цвет любого объекта определяется длиной волны, которую поверхность излучает и отражает. В зависимости от длины волны цвет воспринимается тремя видами фоторецепторов сетчатки (колбочек), соответственно чувствительных к свету с короткими длинами волн (синему), средними (зеленому) или длинными (красному). Белый цвет представляет собой сочетание длин волн видимого спектра.

Итак, **геометрическая оптика** — раздел оптики, в котором законы распространения света рассматривают на основе представления о световых лучах. Геометрическую оптику еще называют лучевой оптикой, основная задача которой — изучение изменений направления световых лучей в различных ситуациях (при падении лучей на разные поверхности, прохождении через различные отверстия, линзы, призмы и т.д.).

В основе геометрической оптики лежат четыре основных закона: закон независимости световых лучей, закон прямолинейного распространения света, законы отражения и преломления света. Эти законы отлично работают, когда длина световой волны л

много меньше размеров объектов, присутствующих в данной физической ситуации, то есть геометрическая оптика — предельный случай волновой оптики при λ , стремящейся к нулю.

Закон независимости световых лучей. Если световые лучи пересекаются, то они не оказывают никакого влияния друг на друга. Каждый луч распространяется в пространстве так, как если бы других лучей вообще не было.

Закон прямолинейного распространения света. В прозрачной однородной среде световые лучи являются прямыми линиями и, соответственно, распространяются прямолинейно. Среда, в которой может распространяться свет, прозрачна. Среду называют однородной, если ее свойства не меняются от точки к точке, например вода. При отсутствии вышеуказанных условий (прозрачность и однородность) прямолинейное распространение светового луча невозможно.

Если световой луч падает на границу раздела двух сред, например воздух-вода, происходит отражение света: луч изменяет направление своего хода и возвращается в исходную среду. На рис. 1.6. изображены падающий луч АО, отраженный луч ОВ, а также перпендикуляр (нормаль) СО, проведенный к отражающей поверхности PQ в точке падения O. Угол АОС, образованный падающим лучом и нормалью, называют **углом падения**. Угол **отражения** — угол СOB, образованный отраженным лучом и нормалью. Величину углов падения и отражения отсчитывают от нормали.

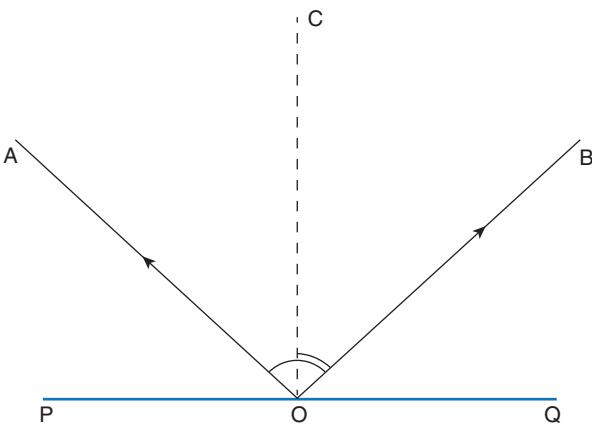


Рис. 1.6. Закон отражения. АО — падающий луч; ОВ — отраженный луч; РQ — отражающая поверхность; СО — нормаль (перпендикуляр к отражающей поверхности)

Закон отражения. Падающий луч, отраженный луч и перпендикуляр (нормаль) к отражающей поверхности, проведенный в точке падения, лежат в одной плоскости. Угол отражения равен углу падения, таким образом, $AOC=COB$. Закон отражения описывает ход отдельных световых лучей — узких пучков света. Однако во многих случаях пучок бывает достаточно широким и состоит из множества параллельных лучей. Картина отражения такого широкого пучка света будет зависеть от свойств отражающей поверхности.

Преломление света. На границе раздела двух прозрачных сред наряду с отражением света происходит его преломление — свет, переходя в другую среду, меняет направление своего распространения. Преломление светового луча происходит при его наклонном падении на поверхность раздела. Если же луч падает перпендикулярно поверхности, то преломления не будет — во второй среде луч сохранит свое направление и также пойдет перпендикулярно поверхности.

Закон преломления. Для простоты понимания этого закона приведем частный случай, когда одна из сред — воздух, а другая — любая отличная от воздуха среда. Рассмотрим ситуацию, когда луч света, идущий в воздухе, наклонно падает на поверхность стекла (очковой линзы). При переходе в среду луч преломляется, и его дальнейший ход показан на рис. 1.7. В точке падения О проведен перпендикуляр (нормаль) CD к поверхности среды. Луч АО называется падающим лучом, а угол α между падающим лучом и нормалью — углом падения. Луч OB — это преломленный луч; угол β между преломленным лучом и нормалью к поверхности — угол преломления.

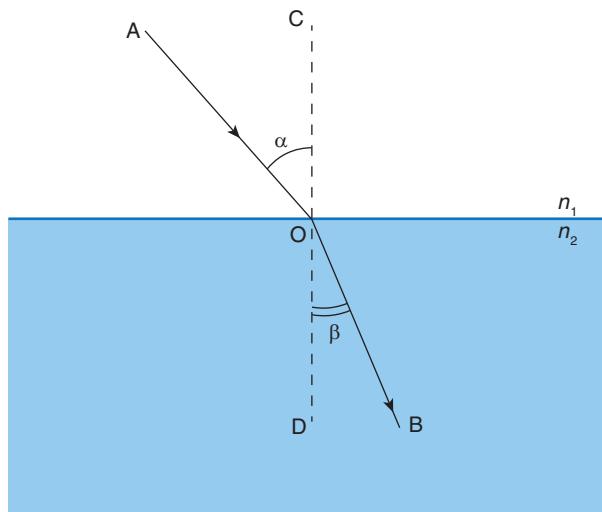


Рис. 1.7. Преломление луча на границе «воздух–среда». АО — падающий луч; О — точка падения; OB — преломленный луч; α — угол падения; β — угол преломления; CD — нормаль (перпендикуляр) к преломляющей поверхности (линии раздела двух сред); n_1 и n_2 — коэффициенты преломления двух сред поверхности

Любая прозрачная среда характеризуется показателем преломления (величиной n) этой среды. Показатель преломления (n) — отношение скорости света в вакууме к скорости света в прозрачной среде. Он непосредственно связан со скоростью распространения света в данной среде (V), которая всегда меньше скорости света в вакууме (С), так как любая иная среда плотнее воздуха (вакуума):

$$n = \frac{C}{V}.$$

Показатель преломления можно измерять для разных длин волн. В Европе показатель преломле-

ния измеряют для зеленой длины волны (546,07 нм) линии ртути (e) и обозначают n_e , в Америке — для длины волны 587,56 нм линии гелия (d) и обозначают n_d . Показатель преломления у стекла $n=1,553$, у пластика CR-39 $n_e=1,498$, у воздуха $n_e=1,0003$, у воды $n_e=1,33$, а у хрусталика — 1,386, то есть показатель преломления у любой среды, кроме вакуума, всегда больше 1,0.

Исходя из вышеизложенного, можно сформулировать закон преломления (см. рис. 1.7):

- 1) падающий луч, преломленный луч и нормаль к поверхности, проведенная в точке падения, лежат в одной плоскости;
- 2) отношение синуса угла падения α к синусу угла преломления β равно показателю преломления среды:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}.$$

Таким образом, отношение синуса угла падения к синусу угла преломления равно отношению скорости света в воздухе к скорости света в среде.

Поскольку показатель преломления всегда больше 1,0, угол преломления всегда меньше угла падения. Следовательно, переходя из воздуха в среду, луч после преломления всегда идет ближе к нормали.

Среду с большим показателем преломления называют оптически более плотной; соответственно, среду с меньшим показателем преломления — оптически менее плотной. Переходя из оптически менее плотной среды в оптически более плотную, световой луч после преломления идет ближе к нормали, в этом случае угол падения больше угла преломления. И наоборот, переходя из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, луч отклоняется дальше от нормали, следовательно, угол падения меньше угла преломления. Переход луча из оптически менее плотной среды в более плотную и обратно подчиняется общим законам преломления, справедливым для любых двух прозрачных сред.

Обратимость световых лучей. Обратный ход луча — его преломление при переходе из среды в воздух — базируется на законе (принципе) обратимости световых лучей: траектория луча не зависит от того, в прямом или обратном направлении распространяется луч. Двигаясь в обратном направлении, луч пойдет в точности по тому же пути, что и в прямом направлении.

Согласно принципу обратимости, при переходе из среды в воздух луч пойдет по той же самой траектории, что и при соответствующем переходе из воздуха в среду, но в противоположном направлении (рис. 1.8).

1.2. ЛИНЗЫ. ПРОСТЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Закон преломления света широко используют в медицинской оптике с целью коррекции рефракционных нарушений, например очковая линза в корригирующих очках.

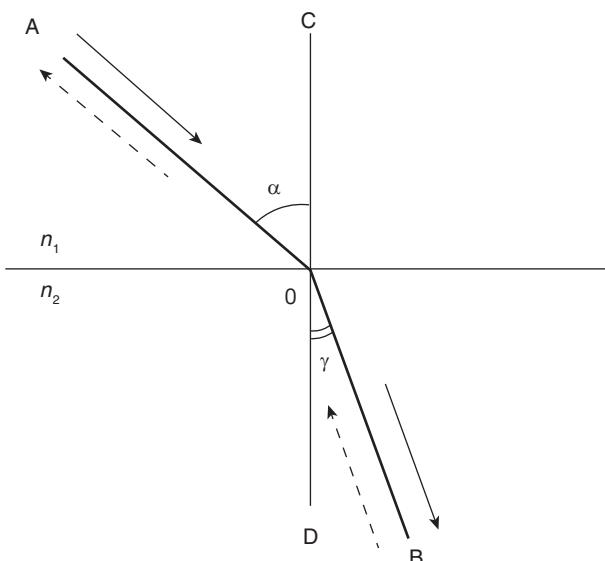


Рис. 1.8. Закон (принцип) обратимости лучей. АО — падающий луч; О — точка падения; ОВ — преломленный луч; α — угол падения; β — угол преломления; СD — нормаль (перпендикуляр) к преломляющей поверхности (линии раздела двух сред); n_1 и n_2 — коэффициенты преломления двух сред поверхности; АВ — прямое направление луча; ВА — обратное направление луча

Линза — оптически прозрачное однородное тело, ограниченное с двух сторон двумя сферическими (или одной сферической и одной плоской) поверхностями. В настоящее время линзы изготавливают из множества материалов (стекла, пластика, поликарбоната и др.), основное свойство которых — прозрачность.

Двояковыпуклой называют линзу, ограниченную с обеих сторон двумя выпуклыми сферическими поверхностями. Рассмотрим ход лучей в этой линзе (**рис. 1.9**). Прямую линию, проходящую через центр симметрии линзы, называют **главной оптической осью**. Она перпендикулярна обеим сферическим поверхностям, поэтому данный луч идет сквозь линзу, не преломляясь. Луч (АВ), идущий параллельно главной оптической оси, преломляется в точке падения В. Поскольку луч переходит из воздуха в оптически более плотное стекло, угол преломления СВЕ меньше угла падения АВД, следовательно, преломленный луч ВС приближается к главной оптической оси. В точке преломления С луч переходит в оптически менее плотный воздух, поэтому угол преломления НСГ больше угла падения ВСГ.

Таким образом, всякий луч, параллельный главной оптической оси, после преломления в линзе приближается к главной оптической оси и пересекает ее. Место пересечения лучей с главной оптической осью называют **фокусом линзы** (F). Линза имеет два фокуса, находящихся на главной оптической оси справа и слева от линзы. Расстояния от фокусов до линз необязательно равнозначны, однако в медицинской оптике фокус чаще всего расположен симметрично относительно линзы.

Фокусировка лучей в точке фокуса зависит от ширины светового луча. Широкий пучок света не фокусируется линзой в одной точке: чем дальше

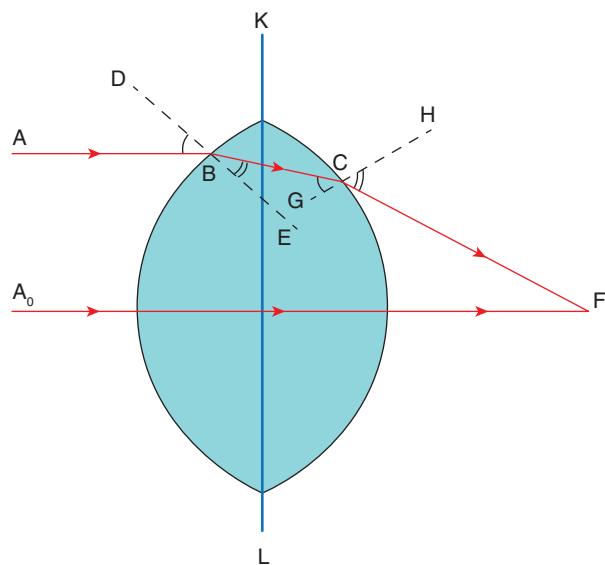


Рис. 1.9. Преломление в двояковыпуклой линзе. A_0F — главная оптическая ось; В — точка падения; С — точка преломления; DE — нормаль к точке падения; HG — нормаль к точке преломления; АВ — падающий луч; СF — преломленный луч; KL — главная оптическая плоскость; F — главный фокус линзы

от главной оптической оси расположена падающий луч, тем ближе к линзе он пересекает главную оптическую ось после преломления. То есть на главной оптической оси, кроме главного фокуса, формируется некоторое количество дополнительных фокусов. Это явление называется **сферической аберрацией** и относится к недостаткам линз. Чем уже световой пучок, параллельный главной оптической оси, тем меньше проявление сферической аберрации. Если использовать узкий световой пучок, идущий вблизи главной оптической оси, можно добиться минимальной сферической аберрации (**рис. 1.10**). Именно поэтому люди с миопией (близорукостью), глядя через узкое отверстие или пластинку с узким отверстием (диафрагму), видят более четко.

Таким образом, узкий пучок света, параллельный главной оптической оси, после прохождения двояковыпуклой линзы собирается приблизительно в одной точке F, а линза называется **собирающей**. Точная фокусировка широкого пучка действительно возможна, но для этого поверхность линзы должна иметь не сферическую, а более сложную асферическую форму (форму эллипса). Радиус кривизны в таких линзах неравномерен, в пределах оптической зоны он возрастает от центра к краю.

Двояковогнутая — линза, ограниченная двумя вогнутыми сферическими поверхностями. Рассмотрим ход двух лучей в двояковогнутой линзе (**рис. 1.11**). Луч, выходящий из точки A_0 и идущий вдоль главной оптической оси, не преломляется и является главной оптической осью данной линзы. Луч АВ, параллельный главной оптической оси, после первого преломления начинает удаляться от нее, а после второго преломления удаляется еще сильнее.

Двояковогнутая линза преобразует параллельный пучок света в расходящийся, поэтому ее на

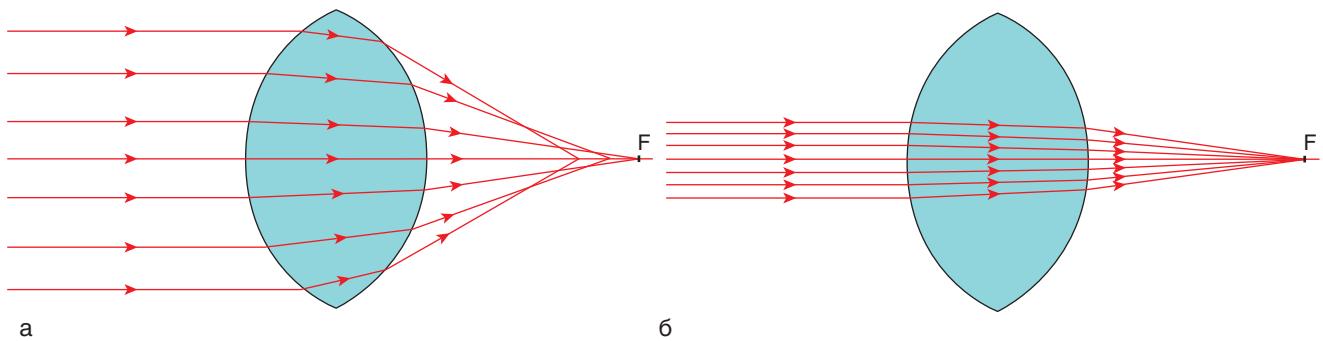
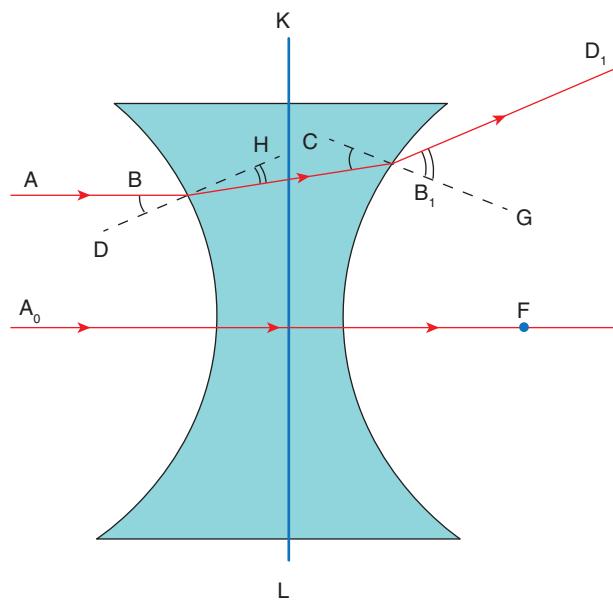


Рис. 1.10. Фокусировка широкого (а) и узкого (б) пучков. F — главный фокус линзы

Рис. 1.11. Преломление в двояковогнутой линзе. A_0F — главная оптическая ось; B — точка падения; B_1 — точка преломления; DH — нормаль к точке падения; CG — нормаль к точке преломления; AB — падающий луч; B_1D_1 — преломленный луч; KL — главная оптическая плоскость; F — главный фокус линзы

зывают **рассеивающей**. При прохождении светового пучка через двояковогнутую линзу также возникает сферическая aberrация. Продолжения расходящихся лучей не пересекаются в одной точке: чем дальше от главной оптической оси расположен падающий луч, тем ближе к линзе пересекает главную оптическую ось продолжение

преломленного луча (рис. 1.12). Как и в случае с двояковыпуклой линзой, сферическая aberrация будет практически незаметна для узкого приосевого пучка.

Другие типы линз. Двояковыпуклая и двояковогнутая линзы служат классическими примерами линз. Однако их практически не применяют для коррекции зрения.

Помимо этих линз, существуют плосковыпуклые и плосковогнутые линзы, у которых одна из поверхностей плоская. С целью коррекции в оптометрии в основном используют вогнуто-выпуклую и выпукло-вогнутую линзы, сочетающие вогнутую и выпуклую граничные поверхности. Такие линзы называют **менисками**. У вогнуто-выпуклой линзы выпуклая (наружная) поверхность в большей степени искривлена (радиус ее кривизны меньше) по сравнению с вогнутой (внутренней) поверхностью, поэтому собирающее действие выпуклой преломляющей поверхности перевешивает рассеивающее действие вогнутой поверхности, и линза в целом оказывается собирающей (рис. 1.13).

Вогнутая поверхность выпукло-вогнутой линзы искривлена в большей степени, так что рассеивающее действие вогнутой границы преобладает над собирающим действием выпуклой границы, и в целом линза оказывается рассеивающей.

Простые оптические системы. В этом разделе мы рассмотрим некоторые простые оптические системы, знание о свойствах которых позволит лучше понять принцип работы средств коррекции.

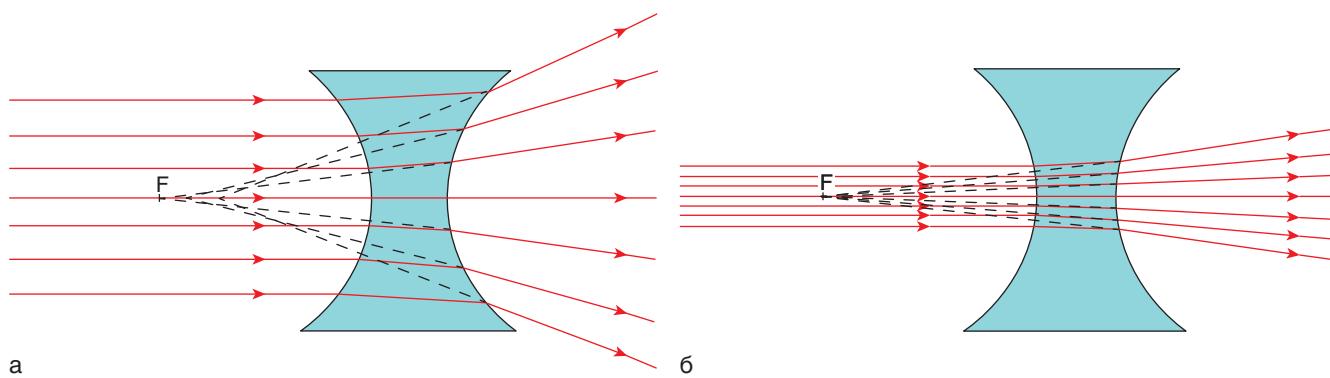


Рис. 1.12. Преломление широкого (а) и узкого (б) пучков в рассеивающей линзе. F — главный фокус линзы

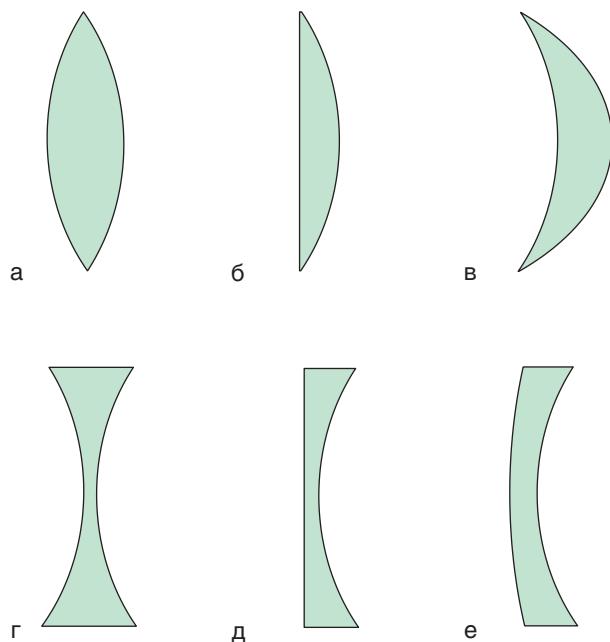


Рис. 1.13. Основные типы линз: а — двояковыпуклая; б — плоско-выпуклая; в — вогнуто-выпуклая, или мениск «положительный»; г — двояковогнутая; д — плосковогнутая; е — выпукло-вогнутая, или мениск «отрицательный»

Плоскопараллельная пластина — прозрачная оптическая деталь, имеющая две плоские параллельные между собой преломляющие грани. Проходя через пластину, луч сохраняет свое направление в результате двухкратного преломления на поверхностях пластины (рис. 1.14) и смещается на некоторое расстояние, которое тем больше, чем больше угол падения луча, толщина пластины и показатель преломления материала пластины.

На рисунке 1.14 изображена плоскопараллельная пластина, представляющая собой тонкий блок с параллельными граними. Красный луч, падающий на левую грань под углом, проходит сквозь пластину и выходит из нее, сохраняя первоначальное направление. Показано, как угол падения и угол выхода одинаковы.

Рис. 1.14. Ход лучей в плоскопараллельной пластине

Плоскопараллельные пластины часто применяют в оптических приборах:

- в качестве входных/выходных окон для предохранения внутренних полостей оптических приборов от проникновения в них пыли и влаги;
- как подложки фильтров и поляризаторов;
- для компенсации сферической aberrации;
- в качестве сеток — плоскопараллельные пластины с выгравированными на них шкалами, которые должны быть видны в поле зрения прибора одновременно с наблюдаемым предметом.

С плоскопараллельной пластиной можно условно сравнить линзу с оптической силой 0 дптр.

Призма. Призма — оптическая деталь с двумя плоскими преломляющими поверхностями, образующими малый двугранный угол Θ , называемый преломляющим углом. Призма всегда отклоняет лучи к своему основанию. В оптометрии отклоняющее действие призм (призматическое действие) измеряют не в градусах, а в призменных диоптриях (пр.дптр, Δ) или сантирадианах (срад). Отклонение лучей призмой силой в 1 пр.дптр (1 срад) на расстоянии 1 м от призмы составляет 1 см (рис. 1.15).

Призматическое действие достигается за счет смещения оптического центра линзы относительно глаза (рис. 1.16).

Из рис. 1.16 видно, что линзу можно представить в виде двух призм. В том случае, когда зрительная ось глаза совпадает с оптической осью линзы, никакого призматического действия пациент не испытывает. При смещении оптического центра линзы возникает призматический эффект. Призматическое действие,

На рисунке 1.15 изображена призма с углом θ . Красный луч падает на призму и отклоняется вправо. На расстоянии 1 метра от призмы на стене отмечено смещение луча на 1 сантиметр вправо. Показано, как угол падения и угол отклонения одинаковы.

Рис. 1.15. Ход лучей в призме с оптической силой 1 пр.дптр

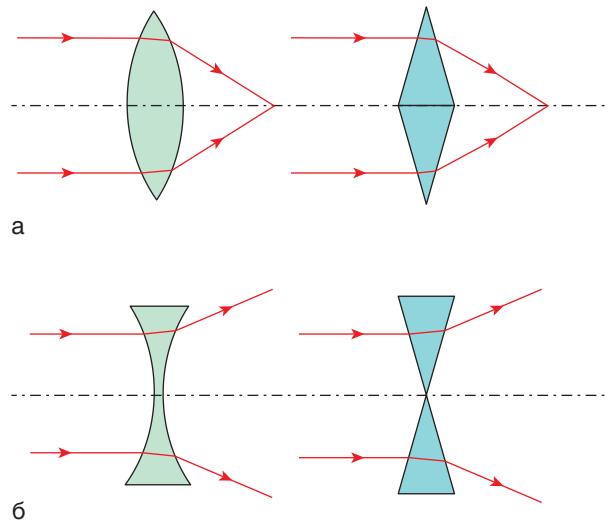


Рис. 1.16. Ход лучей при замене стигматических линз на призмы:
а — положительная линза; б — отрицательная линза

которое создает линза в очках, можно рассчитать по формуле (правило Прентисса):

$$\Delta = \frac{F \times c}{10} \text{ пр.дптр}, \quad (1)$$

где Δ — призматическое действие (пр.дптр); F — оптическая сила линзы (дптр), c — смещение оптического центра (мм).

Цилиндрические и торические линзы. Выпуклая цилиндрическая линза является частью цилиндра и имеет свойство собирать падающий на нее пучок параллельных лучей в линию (**рис. 1.17**). Прямую линию $F_1 F_2$ по аналогии с фокусной точкой сферической линзы называют фокальной линией.

При пересечении цилиндрической поверхности плоскостями, проходящими через оптическую ось, в сечениях получаются окружность, эллипсы и прямая. Два таких сечения называют главными: одно, вертикальное, проходит через ось цилиндра; другое, горизонтальное, — перпендикулярно ей. В первом сечении образуется прямая, во втором — окружность. Таким образом, в цилиндрической линзе различают два главных сечения. Лучи, падающие на ось линзы, не подвергаются преломлению, а падающие на горизонтальное сечение — собираются на фокальной линии, в точке ее пересечения с оптической осью.

Более сложной является линза с торической поверхностью, которая имеет форму изогнутого цилиндра, другими словами, «бублика». Такая поверхность тоже будет иметь два главных сечения с разной оптической силой. Торические поверхности используют при изготовлении как контактных, так и очковых линз.

В оптометрии используют еще один вид линз — афокальные. **Афокальная линза** — это очковая линза с номинально нулевой рефракцией, у которой обе сферические поверхности имеют одинаковый радиус, но одна поверхность вогнутая, а другая — выпуклая (**рис. 1.18**).

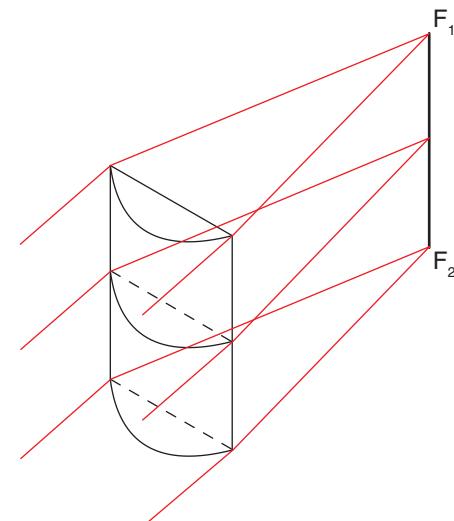


Рис. 1.17. Ход лучей в цилиндрической линзе. $F_1 F_2$ — фокальная линия

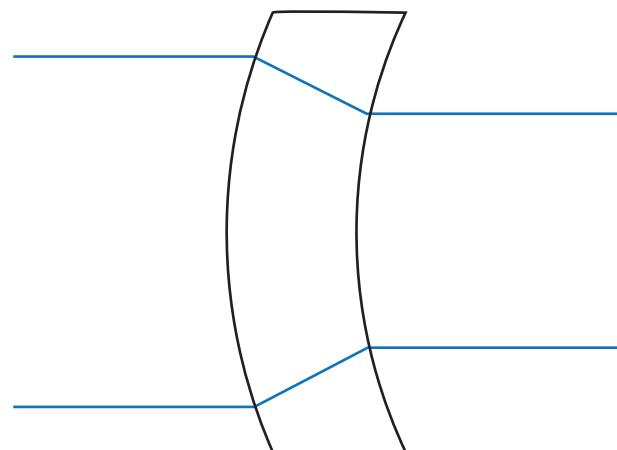


Рис. 1.18. Ход лучей в афокальной линзе

Такая линза не имеет фокуса и, следовательно, не может формировать изображение. Однако, находясь на пути светового пучка, несущего изображение, она его увеличивает (если свет идет справа налево) или уменьшает (если свет идет слева направо). Такое действие афокальной линзы называют **эйконическим** (от греч. *eikonos* — «изображение»). Чаще для этой цели применяют не одиночные линзы, а их системы, например телескопы. Эйконическое действие присуще и обычным сферическим линзам: положительные линзы увеличивают, а отрицательные — уменьшают изображение.

Понятие тонкой линзы. Для удобства понимания и построения изображения используют «идеальную» линзу, которую в оптике называют тонкой линзой. Это линза, толщина которой близка к нулю. Для понимания «тонкости» идеальной линзы рассмотрим **рис. 1.19**, где r_1 и r_2 — радиусы кривизны сферических поверхностей линзы, а расстояние LM — толщина линзы. Предполагается, что толщина линзы LM меньше r_1 и r_2 . При таком условии, хотя поверхности линз и будут выпуклыми, они могут восприниматься как «почти плоские». Таким образом, линза

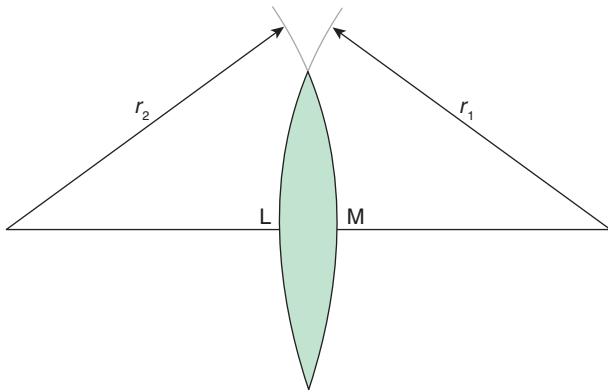


Рис. 1.19. Тонкая линза: r_1 и r_2 — радиусы кривизны сферических поверхностей линзы; LM — толщина линзы

является тонкой, если толщина ее много меньше радиусов кривизны ее сферических границ и расстояния от линзы до предмета. Несмотря на то обстоятельство, что данный пример рассмотрен на двояковыпуклой линзе, это понятие можно транслировать и на другие (двуоковогнутые) линзы.

Условное обозначение тонких линз показано на **рис. 1.20**.

Оптический центр и фокальная плоскость. Точку О называют оптическим центром линзы, она находится на пересечении линзы с ее главной оптической осью (см. **рис. 1.20**).

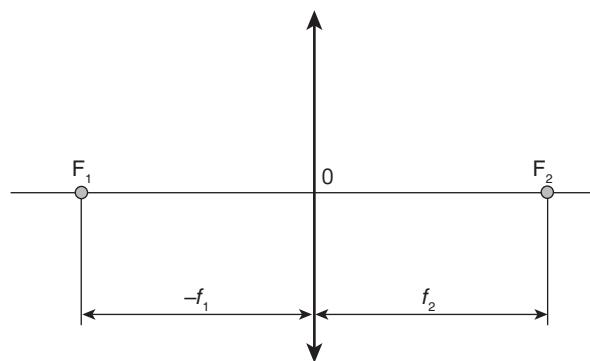
Расстояние OF от оптического центра линзы до фокуса называют **фокусным расстоянием линзы** и обозначают буквой f . **Величина D, обратная фокусному расстоянию, отражает оптическую силу линзы:**

$$D = \frac{1}{f} \text{ (формула Дондерса).} \quad (2)$$

Эту формулу мы можем использовать как для вычисления оптической силы линзы, зная фокусное расстояние, так и для определения фокусного расстояния, зная оптическую силу линзы:

$$f = \frac{1}{D}. \quad (3)$$

Поскольку фокусное расстояние измеряют в метрах, то значение «1» означает 1 м, или 100 см. Оптическую силу измеряют в диоптриях (дптр). Так,



а

если фокусное расстояние линзы составляет 1 м, то ее оптическая сила равна 1 дптр:

$$D = \frac{1}{1} = 1 \text{ дптр.} \quad (4)$$

Таким образом, за 1 дптр принимают линзу с фокусным расстоянием 1 м.

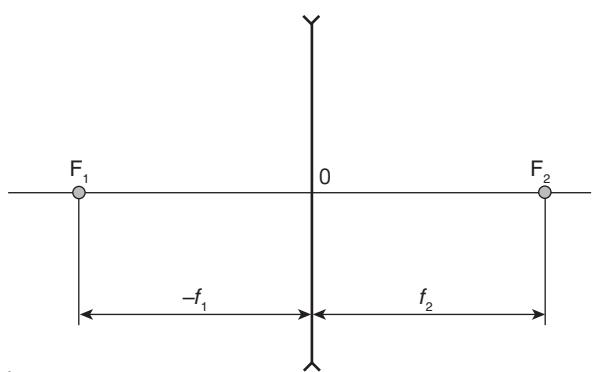
Любую прямую, проходящую через оптический центр линзы и отличную от главной оптической оси, называют **побочной оптической осью**. На **рис. 1.21** изображена побочная оптическая ось — прямая Р'Р. Плоскость А называют **главной оптической плоскостью линзы**, а плоскость π , проходящую через главный фокус линзы F перпендикулярно главной оптической плоскости линзы, **фокальной плоскостью**. Таким образом, фокальная плоскость параллельна главной оптической плоскости линзы. Имея два фокуса, линза, соответственно, имеет и две фокальные плоскости, расположенные симметрично относительно линзы.

Точка Р, в которой побочная оптическая ось пересекает фокальную плоскость, называется **побочным фокусом**. Собственно, каждая точка фокальной плоскости (кроме F) есть побочный фокус, а саму точку F (фокус линзы) в связи с этим называют еще и **главным фокусом**. **Главный фокус линзы** — точка на главной оптической оси, через которую проходят лучи, параллельные главной оптической оси, после преломления в линзе или продолжения этих лучей.

Понятия побочной оптической оси, главной оптической и фокальной плоскостей, побочного фокуса совершенно аналогично определяются для рассеивающей и собирающей линз.

Ход луча через оптический центр. Отличие тонкой линзы от обычных заключается в том, что луч, идущий вдоль главной оптической оси, и луч, идущий вдоль побочной оптической оси, не преломляются.

Это обусловлено тем, что толщина тонкой линзы близка к нулю, следовательно, преломления передней и задней поверхностей линзы сольются в одно и луч, идущий вдоль побочной оптической оси, не преломится и не изменит своего направления. Это характерно как для собирающей линзы, так и для рассеивающей (**рис. 1.22**). В остальном ход лучей в них оказывается различным.



б

Рис. 1.20. Условное обозначение тонкой линзы: а — собирающей; б — рассеивающей. F_1 и F_2 — главные фокусы линзы; прямая F_1F_2 — главная оптическая ось линзы; О — оптический центр линзы; отрезок оптической оси f_1 и f_2 — фокусное расстояние линзы

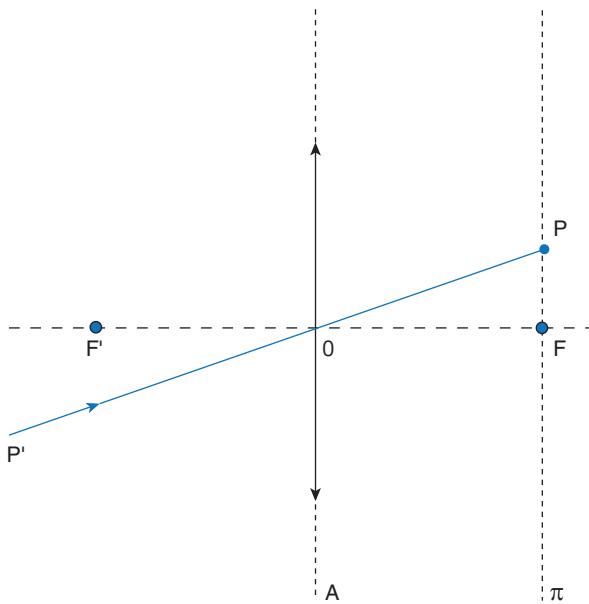


Рис. 1.21. Основные элементы тонкой собирающей линзы: $F'F$ — главная оптическая ось; $P'P$ — побочная оптическая ось; O — оптический центр линзы; F — главный фокус линзы; P — побочный фокус линзы; A — главная оптическая плоскость линзы; π — фокальная плоскость

Ход лучей в собирающей линзе. Как было сказано выше, собирающая линза собирает световой пучок, параллельный главной оптической оси, после прохождения линзы в ее главном фокусе. Иногда

этот фокус называют задним главным фокусом (рис. 1.23).

С другой стороны, если в главном фокусе собирающей линзы находится точечный источник света, то на выходе из линзы получится световой пучок, параллельный главной оптической оси (рис. 1.24). Это возможно благодаря обратимости световых лучей. Этот фокус называют передним главным фокусом.

В том случае, если пучок параллельных лучей падает на собирающую линзу наклонно, он тоже собирается в фокусе, но в побочном. Этот побочный фокус P отвечает тому лучу, который проходит через оптический центр линзы O и не преломляется (рис. 1.25).

Правила хода лучей в собирающей линзе:

- 1) луч, идущий через оптический центр линзы, не преломляется;
- 2) луч, идущий параллельно главной оптической оси линзы, после преломления пойдет через главный фокус;
- 3) если луч падает на линзу наклонно, то для построения его дальнейшего хода мы проводим побочную оптическую ось, параллельную этому лучу, и находим соответствующий побочный фокус; через него и пойдет преломленный луч.

Ход лучей в рассеивающей линзе. Рассеивающая линза преобразует пучок света, параллельный главной оптической оси, в расходящийся пучок, как бы выходящий из главного фокуса (рис. 1.26).

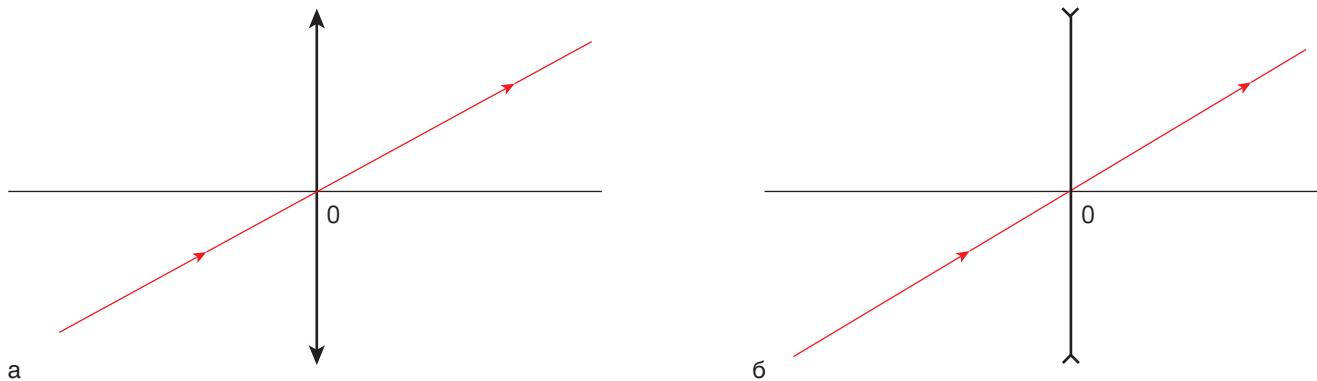


Рис. 1.22. Луч, идущий через оптический центр тонкой линзы, не преломляется: а — собирающая линза; б — рассеивающая линза

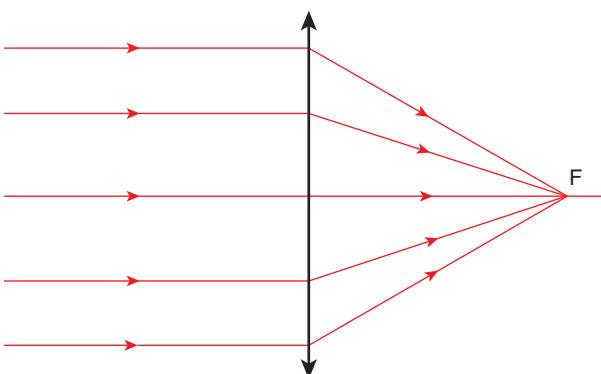


Рис. 1.23. Параллельный пучок световых лучей собирается в главном фокусе

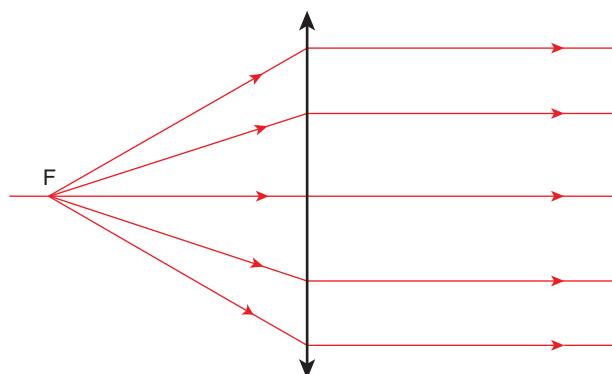


Рис. 1.24. Преломление расходящегося пучка, идущего из главного фокуса — F

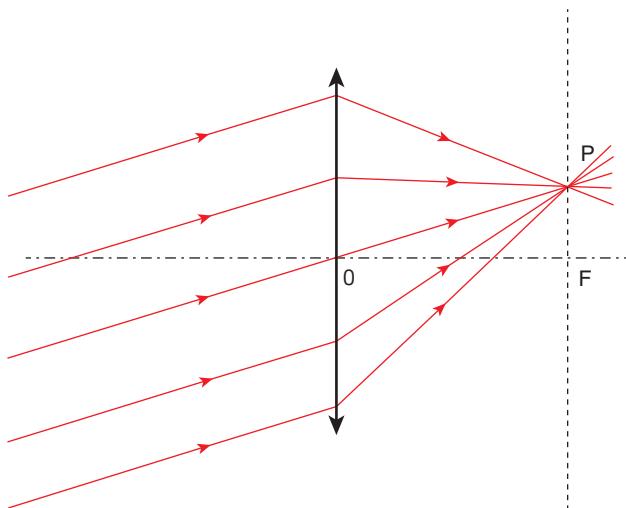


Рис. 1.25. Параллельный пучок собирается в побочном фокусе — Р; О — оптический центр линзы; F — главный фокус линзы

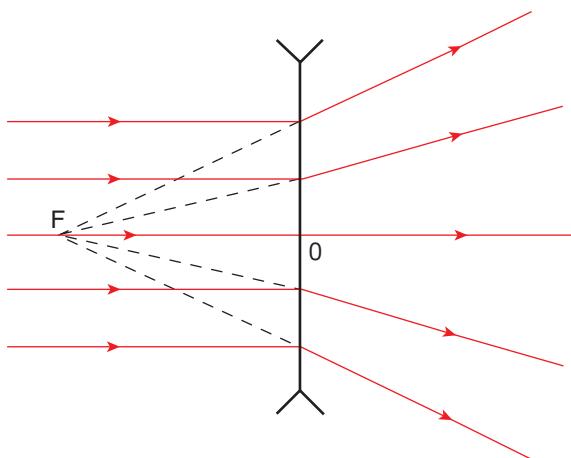


Рис. 1.26. Рассеяние параллельного пучка. О — оптический центр линзы; F — главный фокус линзы

Продолжаясь, лучи расходящегося пучка пересекутся в фокусе F позади линзы.

Если параллельный пучок падает на линзу наклонно, то после преломления он также станет расходящимся. Продолжения лучей расходящегося пучка соберутся в побочном фокусе Р, отвечающем тому лучу, который проходит через оптический центр линзы и не преломляется (рис. 1.27). Этот расходящийся пучок создаст у нас **иллюзию светящейся точки**, расположенной в побочном фокусе Р за линзой.

Правила хода лучей в рассеивающей линзе:

- 1) луч, идущий через оптический центр линзы, не преломляется;
- 2) луч, идущий параллельно главной оптической оси линзы, после преломления начнет удаляться от главной оптической оси; при этом продолжение преломленного луча пройдет через главный фокус;
- 3) если луч падает на линзу наклонно, то мы проводим побочную оптическую ось, параллельную этому лучу, и находим соответствующий побочный фокус; преломленный луч пойдет так, словно он исходит из этого побочного фокуса.

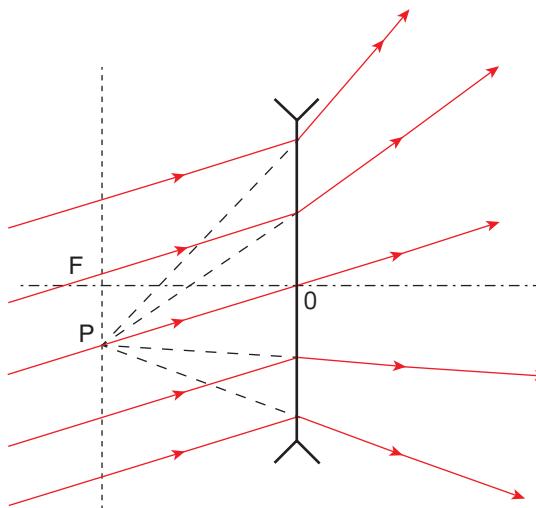


Рис. 1.27. Рассеяние наклонного параллельного пучка. О — оптический центр линзы; F — главный фокус линзы; Р — побочный фокус линзы

Благодаря тому, что лучи, исходящие из одной точки, после прохождения через линзу снова собираются в точку, линза обладает свойством формировать **изображения предметов** (рис. 1.28).

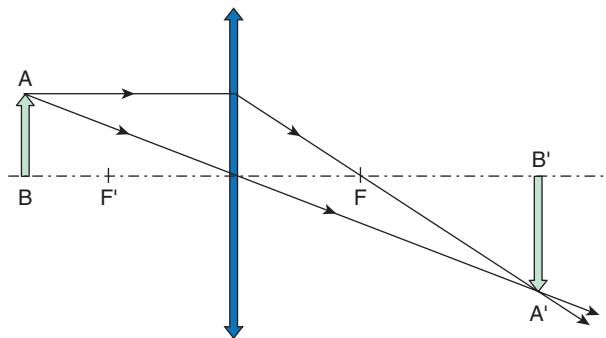


Рис. 1.28. Формирование изображения тонкой собирающей линзой. АВ — предмет; F и F' — главные фокусы линзы; А'В' — изображение предмета, действительное, увеличенное, перевернутое

Правила хода лучей в собирающей и рассеивающей линзах имеют большое практическое значение, так как они позволяют графически строить изображения, передаваемые линзами.

Понятие о действительном и мнимом изображениях.

Если перед линзой находится светящаяся точка S, то после преломления в линзе все лучи (или их продолжения) пересекаются в одной точке S'. Точку S' называют изображением точки S. Если в точке S' пересекаются сами преломленные лучи, то изображение называют **действительным** (рис. 1.29, а). Оно может быть получено на экране, так как в точке S' концентрируется энергия световых лучей. Если же в точке S' пересекаются не сами преломленные лучи, а их продолжения (так бывает, когда преломленные лучи расходятся после линзы), то изображение называют **мнимым** (рис. 1.29, б). Его нельзя получить на экране, поскольку в точке S' не сосредоточено никакой энергии. Мнимое изображение возникает благодаря способности нашего мозга достраивать

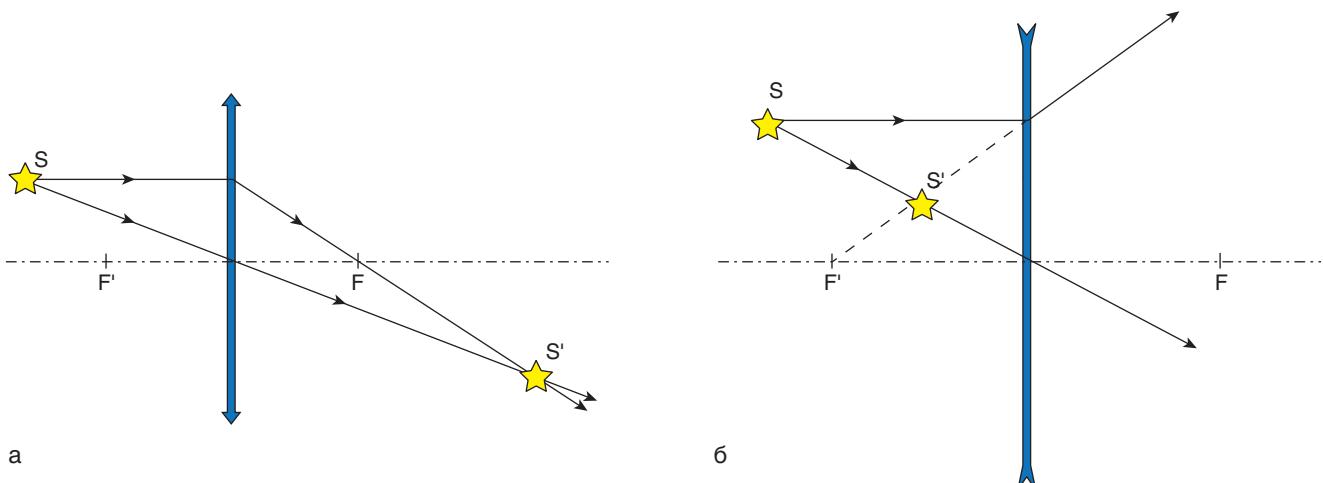


Рис. 1.29. Формирование изображения линзами: а — собирающей линзой — действительное; б — рассеивающей линзой — мнимое; S — предмет; S' — изображение предмета; F и F' — главные фокусы линзы

расходящиеся лучи до их мнимого пересечения и видеть в этом пересечении светящуюся точку. **Мнимое изображение существует лишь в нашем сознании.** Понятие действительного и мнимого изображений очень важно при изучении формирования изображения у гиперметропов (людей с дальнозоркостью).

1.3. СЛОЖНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ГЛАЗА

До сих пор речь шла об идеальных линзах, как бы не имеющих толщины (за исключением афокальных). В медицинской оптике приходится иметь дело с линзами, имеющими реальную толщину, а еще чаще — с системами линз. Несколько преломляющих поверхностей (например, зеркал, призм, плоскопараллельных пластин, клиньев) или тонких линз, находя-

щихся на конечном расстоянии друг от друга, составляют сложную оптическую систему, обеспечивающую определенное формирование пучков световых лучей. Типичная сложная оптическая система — толстая линза, имеющая две преломляющие поверхности и однородную среду между ними (рис. 1.30).

К сложным оптическим системам относят объективы, телескопы, микроскопы, диоптрометры и другие оптические приборы. Систему называют **центрированной**, если оси составляющих ее элементов совпадают с оптической осью системы. **Глаз человека** представляет собой **сложную оптическую систему**, которая состоит из роговицы, влаги передней камеры, хрусталика и стекловидного тела. Приближенно можно считать, что преломляющие поверхности глаза сферичны и их оптические оси совпадают, то есть глаз — центрированная система. Более подробно изучением этих вопросов занимается физиологическая оптика.

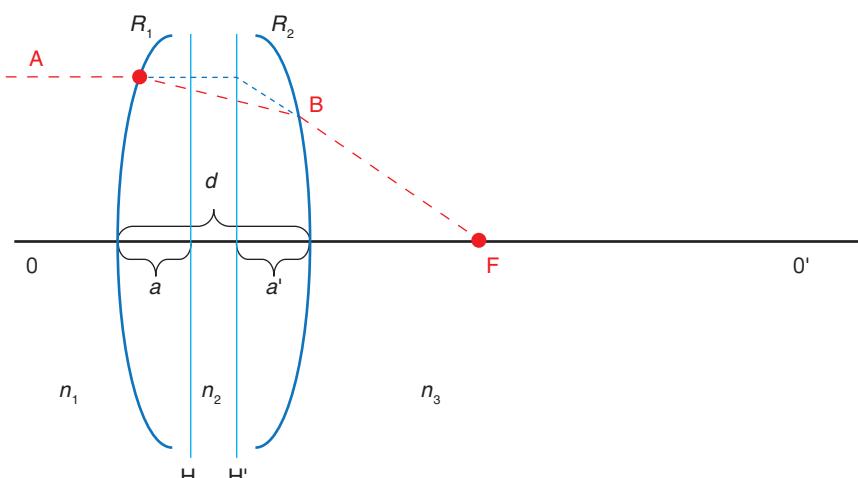


Рис. 1.30. Толстая двояковыпуклая линза (а) и схема прохождения луча через такую линзу (б): луч AF пересекает оптическую ось OO' в точке фокуса F . R_1 и R_2 — радиусы кривизны передней и задней поверхностей линзы; H и H' — главные плоскости линзы; d — толщина линзы; a и a' — расстояние от передней и задней главных плоскостей до соответствующих ее поверхностей; n_1 , n_2 , n_3 — коэффициент преломления сред по ходу следования луча AF