

1. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Содержание теоретического материала

Прямолинейность распространения света. Законы отражения и преломления света. Показатель преломления. Полное внутреннее отражение. Линзы. Фокусное расстояние и оптическая сила линзы. Формула тонкой линзы. Увеличение линзы.

Контрольные вопросы

1.1. Дайте определение основным понятиям геометрической оптики: луч, источник света, точечный источник света, оптическая система.

1.2. Сформулируйте законы обратимости световых лучей и прямолинейности распространения света.

1.3. Какие лучи света называются падающими, отраженными и преломленными? Какие углы, соответственно, называются углами падения, отражения и преломления?

1.4. Сформулируйте законы отражения света.

1.5. Какое отражение света называется диффузным, какое зеркальным?

1.6. Почему в свете фар автомобиля лужа на асфальте ночью кажется водителю темным пятном?

1.7. Как строится изображение точки в плоском зеркале?

1.8. Постройте изображение горизонтально расположенного предмета в зеркале, плоскость которого составляет угол 45° с горизонтом; сделайте то же самое для вертикально расположенного предмета.

1.9. Светящаяся точка приближается к плоскому зеркалу со скоростью v . С какой скоростью будет казаться движущимся ее изображение, если вести наблюдение в системе отсчета, связанной с зеркалом? со светящейся точкой?

1.10. Какими характеристиками обычно определяют изображение предмета, даваемого оптической системой?

1.11. Охарактеризуйте изображение, даваемое плоским зеркалом.

1.12. При каком условии плоское зеркало может дать действительное изображение?

1.13. Человек, стоящий на берегу озера, видит на гладкой поверхности воды изображение Солнца. Как будет перемещаться это изображение при удалении человека от озера?

1.14. Проведите небольшой эксперимент: поставьте вертикально один за другим на некотором расстоянии два карандаша. Прищурьте левый глаз и расположите карандаши так, чтобы один закрывал другой. А теперь откройте левый глаз, но закройте правый. Что произошло? Посмотрите двумя глазами. Объясните то, что увидели. (Примечание: долго напрягать зрение при этом нельзя — можно утомить глаза).

1.15. Сформулируйте законы преломления света. Чем различаются относительный и абсолютный показатели преломления?

1.16. Как связан показатель преломления со скоростями света в первой и второй среде?

1.17. Какая среда называется оптически менее плотной, какая — оптически более плотной?

1.18. Как связаны абсолютные показатели преломления двух сред со скоростями света в них?

1.19. Как соотносятся величины угла падения и угла преломления при переходе света из одной среды в другую?

1.20. В каком случае угол преломления луча равен углу падения?

1.21. Нарисуйте ход луча света, идущего от некоторой точки внутри воды к глазу наблюдателя, находящегося в воздухе.

1.22. Чем ближе к поверхности Земли, тем больше оптическая плотность воздуха. Как скажется это на ходе луча, идущего в атмосферу Земли из космоса?

1.23. Нарисуйте ход луча света через плоскопараллельную пластинку в случаях: а) окружающая среда является оптически менее плотной, чем пластинка; б) окружающая среда является оптически более плотной, чем пластинка.

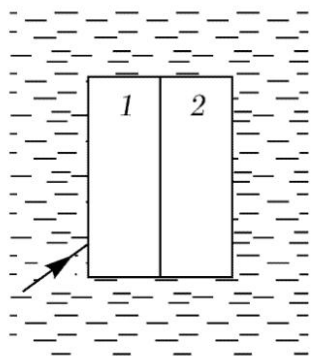


Рис. VIII.1

1.24. Нарисуйте ход лучей через две плоскопараллельные пластинки (рис. VIII.1), находящиеся в воде. Соотношение показателей преломления воды, первой и второй пластинок следующее: $n_2 > n_w > n_1$. Напишите соотношение между углами падения и преломления для всех границ раздела.

1.25. В чем заключается явление полного внутреннего отражения? Какой угол называется предельным углом полного внутреннего отражения? Как определить значение этого угла?

1.26. Как можно изменить направление хода лучей, используя явление полного внутреннего отражения в прямоугольной равнобедренной призме?

1.27. На чем основано явление передачи света по световодам?

1.28. Резкий изгиб световода приводит к прекращению его действия. Почему?

1.29. Аквалангист, плавающий под водой, всегда может видеть рыбака, находящегося на берегу. Рыбак же, сидящий на берегу, лишь в редких случаях может увидеть аквалангиста под водой. Почему?

1.30. Граница раздела двух однородных сред освещается рассеянным светом. Свет идет из оптически менее плотной среды в оптически более плотную. В каких пределах будут меняться углы падения и углы преломления?

1.31. Что собой представляют линзы? Какого вида они бывают?

1.32. Какие линзы называются собирающими, какие рассеивающими?

1.33. Какие линзы называют тонкими?

1.34. Дайте определение следующим основным понятиям, относящимся к линзам: оптическая ось, оптический центр, главный и побочный фокусы линзы.

1.35. Как построить изображение светящейся точки в собирающих и рассеивающих линзах? Отдельно рассмотрите случай, когда точка лежит на главной оптической оси.

1.36. На рис. VIII.2 показаны положения главной оптической оси MN тонкой линзы, светящейся точки S и ее изображения S' . Найдите построением положение оптического центра линзы и ее фокуса для обоих случаев.

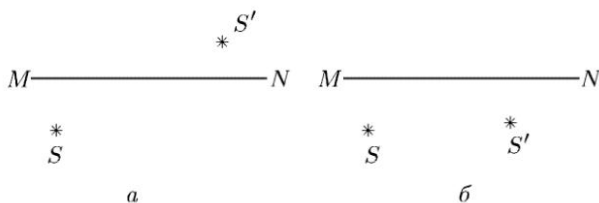


Рис. VIII.2

1.37. Укажите, какие из линз, изображенных на рис. VIII.3, непригодны для получения действительных изображений предметов.

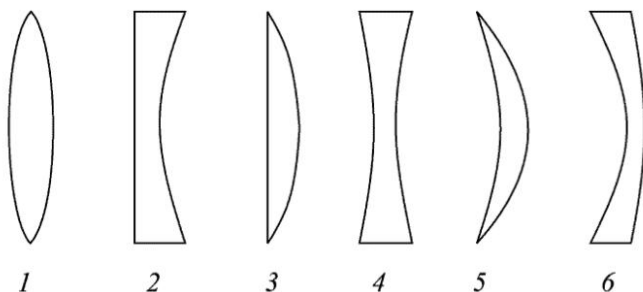


Рис. VIII.3

1.38. Напишите формулу тонкой линзы и дайте к ней пояснения.

1.39. Какая величина называется оптической силой линзы и какова ее размерность?

1.40. Какой формулой определяется увеличение линзы?

1.41. Получится ли изображение предмета AB (рис. VIII.4), если в линзе места C и D непрозрачны?

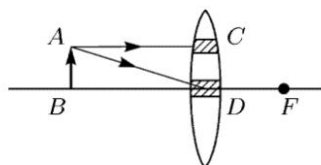


Рис. VIII.4

1.42. Что собой представляет оптическая система глаза?

1.43. В чем заключается свойство глаза, называемое аккомодацией?

1.44. Как осуществляется адаптация глаза?

1.45. Какой угол называют углом зрения?

1.46. Какой дефект зрения называют близорукостью и как его корректируют?

1.47. Какой дефект зрения называют дальнозоркостью и как его корректируют?

1.48. Когда оптическая сила глаза больше: при рассмотрении близких или далеких предметов?

1.49. Очки имеют оптическую силу $+2$ дптр. Какие линзы в этих очках? Какой дефект устраняют эти очки?

1.50. Как определить оптическую силу системы, состоящей из нескольких тонких линз, сложенных вплотную?

1.51. В комнате, освещенной электрической лампой, надо определить, какая из двух собирающих линз имеет большую оптическую силу? Как это сделать?

1.52. Имеются собирающая и рассеивающая линзы. Каким образом, не измеряя фокусных расстояний, можно сравнить значения оптических сил обеих линз?

1.53. Как собирающая линза используется в качестве лупы для рассматривания близких предметов?

Ответы

1.1. В геометрической оптике рассматриваются законы распространения света в прозрачных средах на основе представлений о свете как о совокупности лучей. *Луч* — это линия, вдоль которой распространяется световая энергия. *Источник света* — тело, излучающее световую энергию в окружающую среду. При излучении источник света теряет часть своей энергии; при поглощении света внутренняя энергия тела увеличивается: его температура возрастает, могут происходить химические реакции, световая энергия может быть преобразована в механическую и электрическую. Таким образом, распространение света сопровождается переносом энергии.

Источник света называется *точечным*, если его размеры малы по сравнению с расстоянием до места наблюдения.

Устройство, с помощью которого преобразуется ход лучей, представляет собой *оптическую систему*. Источником лучей для оптической системы служит любой предмет, который излучает или отражает световую энергию.

1.2. В геометрической оптике используются следующие экспериментальные законы.

А. Закон обратимости световых лучей.

Пусть на какую-либо оптическую систему CC' падает луч A , а выходит из нее соответствующий ему луч B (рис. VIII.5 а). Если пустить теперь падающий луч вдоль луча B навстречу ему (луч B'), получим выходящий из системы луч A' , который идет вдоль луча A навстречу ему (рис. VIII.5 б).

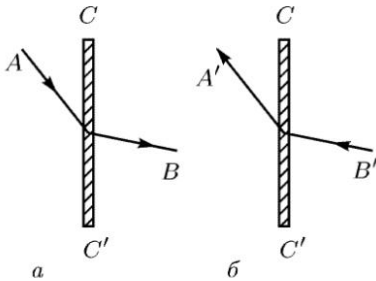


Рис. VIII.5

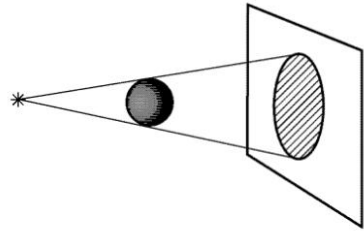


Рис. VIII.6

Б. Закон прямолинейности распространения света.

В однородной среде свет распространяется прямолинейно. Прямолинейность распространения света приводит к тому, что за непрозрачными телами, освещенными одним точечным источником света, образуются тени, размеры которых определяются взаимным расположением источника света, тела и экрана (рис. VIII.6).

1.3. *Границей раздела* двух сред назовем поверхность, разделяющую две однородные среды I и II (рис. VIII.7).

Луч света, идущий к границе раздела, называется падающим (AO).

Луч, остающийся в первой среде после взаимодействия с границей раздела в точке его падения (т. O), есть отраженный луч (OB).

На границе раздела двух прозрачных сред кроме отражения наблюдается преломление — явление, при котором луч частично проходит во вторую среду, обычно изменяя свое первоначальное направление. Этот луч называется *преломленным* (OC).

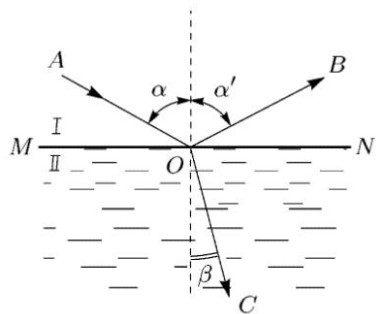


Рис. VIII.7

Угол α между падающим лучом и перпендикуляром, восстановленным к границе раздела двух сред в точке падения луча, называется *углом падения*. Угол α' между лучом отраженным и перпендикуляром, восстановленным к границе раздела двух сред в точке падения луча, называется *углом отражения*.

Угол β между лучом преломленным и перпендикуляром, восстановленным к границе раздела двух сред в точке падения луча, называется *углом преломления*.

1.4. 1. Луч падающий, перпендикуляр, восстановленный к границе раздела двух сред в точке его падения, и луч отраженный лежат в одной плоскости.

2. Угол падения равен углу отражения ($\alpha = \alpha'$, рис. VIII.7).

1.5. *Диффузным* называется отражение, при котором падающий параллельный пучок света после отражения от поверхности рассеивается по разным направлениям. Диффузное рассеивание происходит, если граница раздела представляет собой шероховатую матовую поверхность. Поэтому углы падения и, соответственно, отражения меняются вдоль поверхности (рис. VIII.8 а).

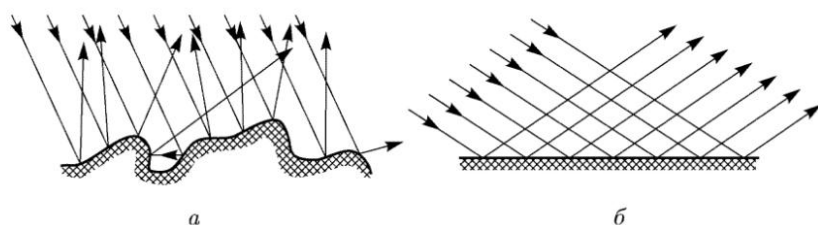


Рис. VIII.8

Зеркальным называется отражение, при котором падающие на границу раздела параллельные лучи после отражения остаются параллельными (рис. VIII.8 б). Зеркальное отражение происходит от гладкой, хорошо отполированной поверхности.

1.6. Поверхность лужи, если нет ветра, отражает свет зеркально. Отраженный свет практически полностью направлен в противоположную сторону. Асфальт же, имея шероховатую поверхность, отражает свет диффузно, и поэтому часть отраженного света попадает от асфальта в глаз водителю.

1.7. Пусть источник света S дает совокупность лучей во всех направлениях. Возьмем из них два: SA и SB (рис. VIII.9). Каж-

дый из них отражается по закону отражения от зеркальной поверхности (лучи AA' и BB'). Продолжим отраженные лучи за плоскость зеркала (AS' и BS'). Точка S' пересечения продолжения лучей за зеркалом будет лежать на том же перпендикуляре к зеркалу, что и точка S и на том же расстоянии от плоскости зеркала ($|SN| = |N'S'|$). В

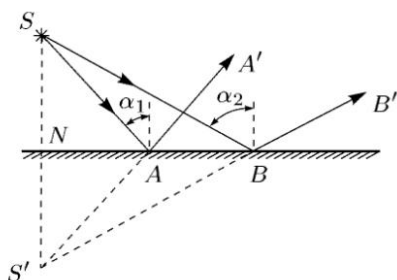


Рис. VIII.9

этом легко убедиться, используя теоремы геометрии. От зеркала отраженные лучи идут расходящимся пучком. Глаз человека обладает способностью воспринимать расходящиеся лучи выходящими из некоторой точки S' . В этой точке S' пересекаются продолжения отраженных лучей за плоскость зеркала. Эта точка называется *мнимым изображением* источника света.

Исходя из вышесказанного, построить изображение протяженного предмета в плоском зеркале можно следующим образом: из каждой точки предмета опустить перпендикуляры на плоскость зеркала и продолжить их за зеркало. Расстояния от основания перпендикуляра до источника света и до его изображения одинаковы. На рис. VIII.10 в качестве примера приведено построение изображения стрелки. Из крайних ее точек A и B

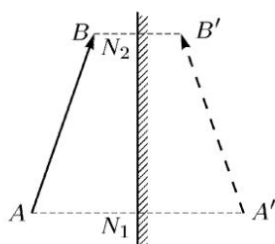


Рис. VIII.10

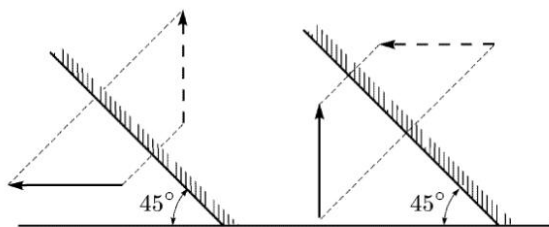


Рис. VIII.11

опущены перпендикуляры и продлены за зеркало. Расстояния от источника света до зеркала и от зеркала до изображения одинаковы, поэтому $|AN_1| = |N_1A'|$, $|BN_2| = |N_2B'|$; A' и B' — мнимые изображения точек A и B . Очевидно, что изображения всех остальных точек стрелки AB находятся между точками A' и B' .

1.8. См. рис. VIII.11.

1.9. В системе отсчета, связанной с зеркалом, — со скоростью v , а в системе, связанной с самой светящейся точкой, — со скоростью $2v$.

1.10. Изображение предмета, которое дает некоторая оптическая система, характеризуют обычно тремя его свойствами.

А. *Мнимое или действительное.*

В том месте, где должно быть изображение предмета, можно поместить бумагу. Если на бумаге сходятся лучи, прошедшие через оптическую систему, то мы увидим изображение предмета. В этом случае изображение называется *действительным*.

В ряде случаев изображение может быть получено не самими лучами, а их продолжениями. Например, в плоском зеркале изображение мы видим как бы за зеркалом, где, разумеется, на самом деле его нет. Поэтому такое изображение будет называться *мнимым*.

Б. Изображение предмета, которое получится после прохождения лучей через оптическую систему, может быть больше или меньше предмета, а также размеры изображения могут быть такие же, как и размеры предмета. В таких случаях говорят, соответственно, что изображение предмета — *увеличенное* или *уменьшенное*, или *в натуральную величину*.

В. При получении изображения в плоском зеркале верхней точке предмета соответствует верхняя точка изображения. Часто после прохождения лучей света через оптическую систему получается, что изображение как бы переворачивается «с ног на голову»: верхней точке предмета соответствует нижняя точка изображения. В первом случае изображение называется *прямым*, во втором случае — *перевернутым*.

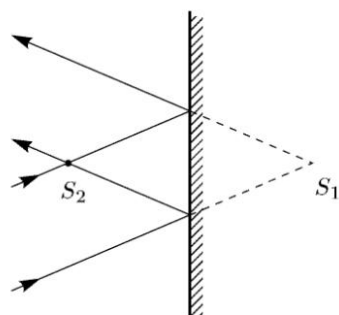


Рис. VIII.12

1.11. Плоское зеркало дает мнимое, в натуральную величину, прямое изображение предмета.

1.12. В случае, если на зеркало падает сходящийся пучок лучей (рис. VIII.12). В этом случае источник света является мнимым и лежит в точке пересечения продолжений падающих лучей (точка S_1). Отраженные лучи пересекаются в точке S_2 , которая представляет собой действительное изображение мнимого источника света.

1.13. Солнечные лучи вблизи поверхности Земли можно рассматривать как поток параллельный лучей (рис. VIII.13). Человек видит изображение Солнца в месте, от которого отражаются лучи, попадающие ему в глаз. Из рис. VIII.13 видно, что при удалении человека от берега изображение Солнца приближается к берегу.

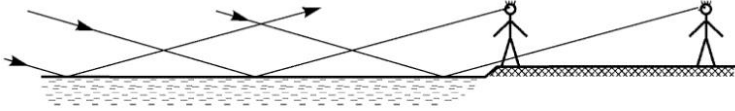


Рис. VIII.13

1.14. Истинное положение предмета и расстояние до него оцениваются обычно при его рассматривании двумя глазами. Пусть при рассматривании одним левым глазом (рис. VIII.14 а) мы поставим карандаши так, что ближайший карандаш заслоняет дальний. Если закрыть левый и открыть правый глаз, то вы увидите оба карандаша, так как лучи от них обоих получили доступ к правому глазу (рис. VIII.14 б). Если вы смотрите «в оба глаза»,

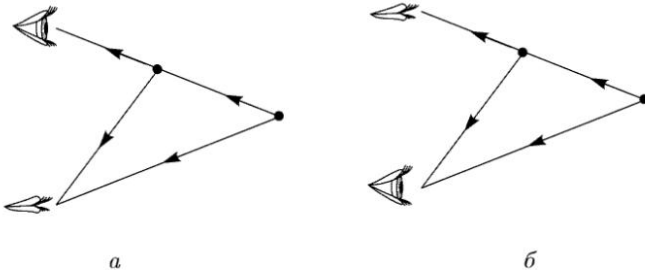


Рис. VIII.14

то также видны оба карандаша. Но при некотором напряжении можно заметить, что передний карандаш как бы двоится: одно его изображение закрывает второй карандаш, другое — нет. Обычно, когда мы рассматриваем отдельные предметы, мы получаем на сетчатке обоих глаз по изображению, которые работой мозга воспринимаются совмещенными.

1.15. 1. Луч падающий, перпендикуляр к границе раздела двух сред в точке падения и преломленный луч лежат в одной плоскости.

2. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данной пары сред. Эта величина

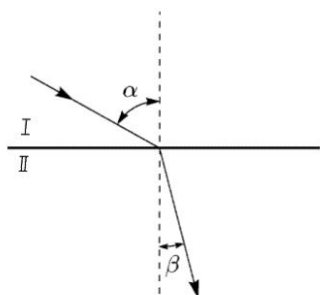


Рис. VIII.15

называется показателем преломления второй среды относительно первой (или *относительным показателем преломления*). Обозначается n_{21} или просто n :

$$n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta},$$

α — значение угла падения, β — угла преломления (рис. VIII.15).

Показатель преломления любой среды относительно вакуума называется *абсолютным показателем преломления*. Значения показателя преломления среды относительно воздуха мало отличаются от значения абсолютного показателя преломления. Поэтому, когда в задачах речь идет о падении света на границу раздела воздух — среда, можно брать значение абсолютного показателя преломления среды.

1.16. Изменение направления лучей при переходе из одной среды в другую связано с изменением скорости распространения света. Исследования показывают, что показатель преломления второй среды относительно первой равен отношению скорости света в первой среде к скорости света во второй среде:

$$n_{21} = v_1/v_2.$$

Отношение скорости света в вакууме (c) к скорости света в данной среде (v) есть *абсолютный показатель преломления* данного вещества:

$$n = c/v$$

($c = 3 \cdot 10^8$ м/с — почти равно скорости света в воздухе).

Слово «абсолютный» обычно опускают и говорят просто о показателе преломления (или коэффициенте преломления) данного вещества. Значения показателей преломления прозрачных однородных веществ приводятся в справочных таблицах.

Значение показателя преломления зависит от химического состава вещества, а для растворов — от концентрации и является важной величиной, характеризующей вещество.

1.17. Среда, в которой скорость распространения света больше, чем в другой среде, называется оптически менее плотной. И наоборот, если скорость света в некоторой среде меньше по отношению к скорости в другой среде, то первая называется оптически более плотной.

1.18. Пусть первая среда имеет абсолютный показатель n_1 и скорость света в ней v_1 , а вторая среда — соответственно, n_2 и v_2 . Тогда можно записать следующее:

$$n_1 = \frac{c}{v_1}; \quad n_2 = \frac{c}{v_2};$$

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c}{n_1} : \frac{c}{n_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Получим, что $n_2/n_1 = v_1/v_2$.

Из последней формулы видно, что для менее плотной среды абсолютный показатель должен быть меньше, чем для более плотной среды (если $v_1 > v_2$, то $n_2 > n_1$).

1.19. Сопоставив закон преломления и полученную формулу в предыдущем ответе, можно записать следующее равенство:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1},$$

n_1 и n_2 — абсолютные показатели преломления первой и второй среды. Из полученного уравнения можно сделать следующие заключения.

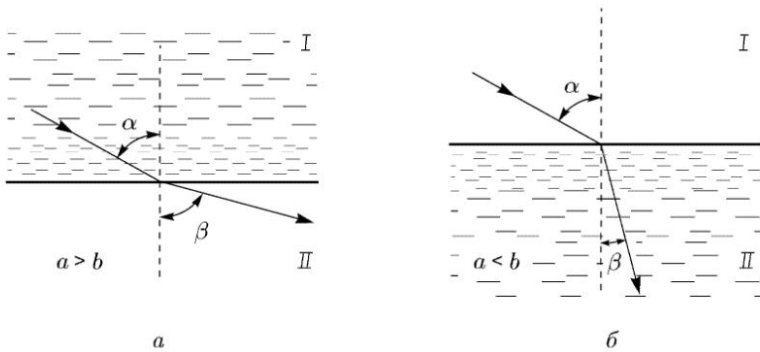


Рис. VIII.16

Если первая среда оптически более плотная, то $n_1 > n_2$, $\sin \beta > \sin \alpha$ и $\beta > \alpha$ (рис. VIII.16 а).

Если же первая среда оптически менее плотная, то $n_1 < n_2$, $\sin \beta < \sin \alpha$ и $\beta < \alpha$ (рис. VIII.16 б).

В соответствии с изложенным можно сделать вывод: в оптически более плотной среде луч света отклонен от нормали на меньший угол, чем в оптически менее плотной среде. То есть в более плотной среде луч «прижимается» к нормали. Это необхо-

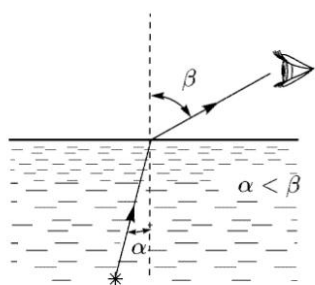


Рис. VIII.17

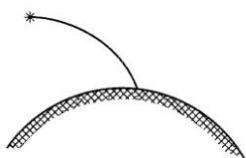


Рис. VIII.18

димом помнить для правильного построения хода лучей света при прохождении их через границу раздела сред с различной оптической плотностью.

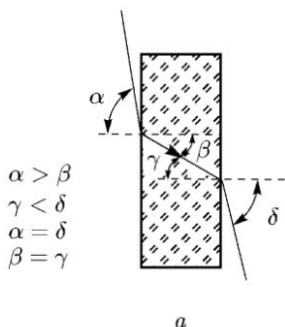
1.20. Если показатели преломления обеих сред одинаковые, а также когда луч падает на поверхность перпендикулярно границе раздела любых двух сред.

1.21. См. рис. VIII.17.

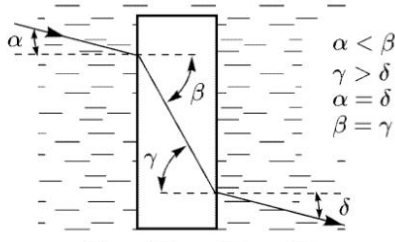
1.22. Луч в атмосфере искривляется, видимое положение светила не совпадает с его действительным положением (рис. VIII.18).

1.23. Ход лучей представлен на рис. VIII.19 а, б. Нетрудно показать,

что выходящий из пластины луч параллелен падающему.



а



б

Рис. VIII.19

1.24. См. рис. VIII.20.

1.25. Пусть свет идет из оптически более плотной среды I в оптически менее плотную II. При этом всегда угол преломления больше угла падения. Пусть точечный источник света S находится в оптически более плотной среде (рис. VIII.21). Лучи от него расходятся по всем направлениям, и угол падения луча на границу

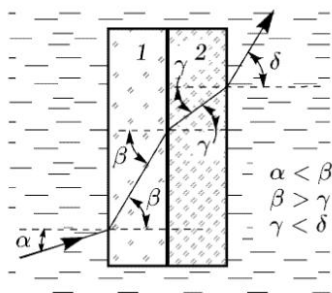


Рис. VIII.20

раздела будет увеличиваться при удалении точки падения от источника света.

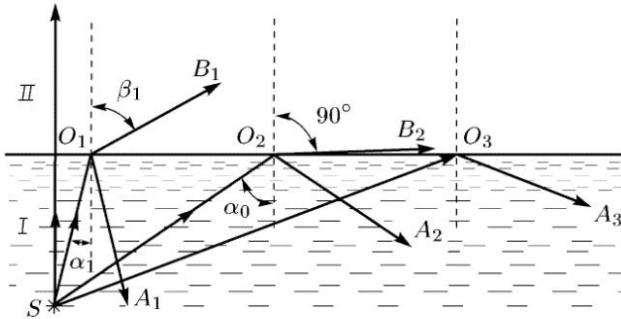


Рис. VIII.21

Луч SO_1 падает на границу раздела и частично отражается от нее (O_1A_1), частично преломляется в менее плотную среду II (O_1B_1). Причем доля отраженной световой энергии много меньше преломленной. При увеличении угла падения доля отраженной световой энергии возрастает, а преломленной — уменьшается. Так как $\beta > \alpha$, то луч преломленный быстрее приближается к границе раздела, чем падающий луч. Существует такой угол падения α_0 (луч SO_2), при котором преломленный луч O_2B_2 имеет угол преломления, близкий к 90° , и интенсивность его ничтожна. Соответствующий отраженный луч — O_2A_2 . При углах падения, больших α_0 , преломленного луча не существует и вся световая энергия отражается: луч SO_3 полностью отражается по направлению O_3A_3 , преломленного луча в точке O_3 нет.

Если граница раздела освещается рассеянным светом, то в каждую ее точку приходят лучи с углами падения от 0° до 90° (рис. VIII.22). Если $\alpha < \alpha_0$, то лучи проходят во вторую среду и соответствующий им угол преломления меняется в пределах от 0° до 90° (например, луч AOA''). При $\alpha > \alpha_0$ преломления не происходит, и все лучи из области BOM отражаются от границы раздела в область $B'ON$. Это явление носит название полного внутреннего отражения.

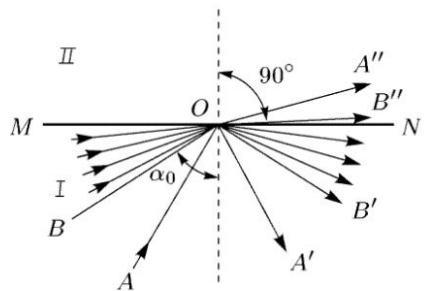


Рис. VIII.22

Угол падения α_0 , при котором угол преломления равен 90° ,

называется предельным углом полного внутреннего отражения. Значение этого угла можно определить, используя закон преломления:

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}; \quad \sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}.$$

Если свет идет из некоторой среды в воздух, то есть $n_2 = 1$, то

$$\sin \alpha_0 = 1/n,$$

n — показатель преломления среды, из которой свет переходит в воздух.

Таким образом, чтобы произошло явление полного внутреннего отражения, свет должен идти из оптически более плотной среды в менее плотную и угол падения лучей на границу раздела двух сред должен быть больше предельного.

Например, если свет идет из воды ($n = 1,33$) в воздух, то значение предельного угла полного внутреннего отражения равно

$$\alpha_0 = \arcsin(1/1,33) \approx \arcsin(0,75) \approx 49^\circ;$$

если же свет идет из стекла ($n = 1,5$) в воздух, то

$$\alpha_0 = \arcsin(1/1,5) \approx \arcsin(0,67) \approx 42^\circ.$$

1.26. Стекланные равнобедренные призмы, в которых происходит явление полного внутреннего отражения, используются в различных оптических приборах для изменения направления световых лучей.

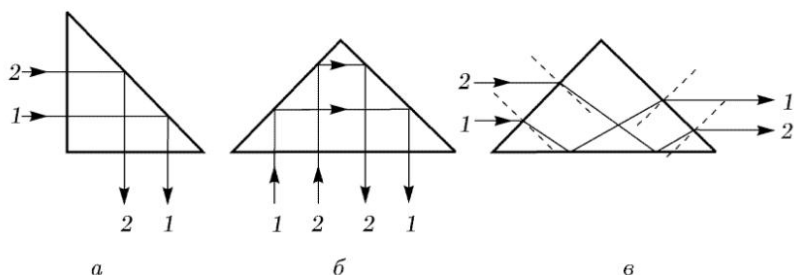


Рис. VIII.23

Призма, изображенная на рис. VIII.23 а, поворачивает световой пучок на 90° . Такие призмы используют, например, в перископах. Призма, показанная на рис. VIII.23 б, изменяет направление светового пучка на 180° . Такие призмы используют в призматических биноклях. Призма, на которую лучи падают так, как показано на рис. VIII.23 в, переворачивает изображение предмета: верхний луч становится нижним, а нижний луч оказывается сверху.

1.27. Раздел оптики, в котором рассматривают передачу света и изображения по светопроводам, называется волоконной оптикой.

Волоконная оптика основана на явлении полного внутреннего отражения. Лучи света, попадая внутрь прозрачного волокна, окруженного веществом с меньшим показателем преломления, многократно отражаются и распространяются вдоль этого волокна при условии, что угол падения больше предельного (рис. VIII.24). Так как при полном внутреннем отражении световая энергия практически не теряется, то интенсивность света на выходе из светопровода достаточно велика. Светопровод часто изготавливают из эластичного материала. Для передачи больших световых

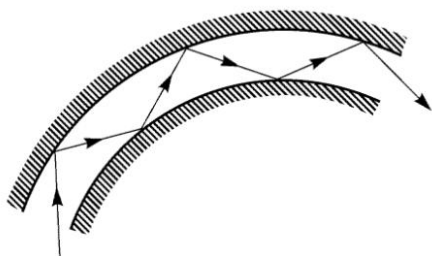


Рис. VIII.24

потоков и сохранения гибкости отдельные тонкие волокна собираются в пучки (жгуты) — световоды. Световоды широко используются в медицине для освещения холодным светом полостей внутренних органов и для передачи изображения.

1.28. В месте изгиба светопровода угол падения становится меньше предельного угла полного внутреннего отражения и поэтому свет выходит из светопровода через боковую поверхность.

1.29. Свет, отраженный от аквалангиста при углах падения лучей, больших предельного, испытывает полное отражение от границы вода–воздух, и рыбак его не видит. Рыбак увидит аквалангиста, если тот будет проплывать от него достаточно близко. Свет же от рыбака при любом угле падения проходит в воду, и аквалангист его увидит на любом расстоянии.

1.30. Так как граница раздела освещается рассеянным светом, то углы падения лучей, падающих в каждую точку, меняются от 0° до 90° . Используя принцип обратимости геометрической оптики и закон преломления, нетрудно показать, что угол преломления в данном случае будет меняться от 0° до значения предельного угла полного внутреннего отражения для данной пары сред (α_0). В данном случае его можно назвать предельным углом преломления.

1.31. Прозрачные для света тела, ограниченные двумя выпуклыми или вогнутыми поверхностями, называются *линзами* (одна боковая поверхность может быть плоской).

Линзы можно получить из любого прозрачного для света вещества. Поверхности линз могут представлять собой часть сферы, цилиндра, параболоида. В связи с этим различают сферические, цилиндрические и параболические линзы.

На рис. VIII.25 представлены разные виды наиболее широко распространенных сферических линз.

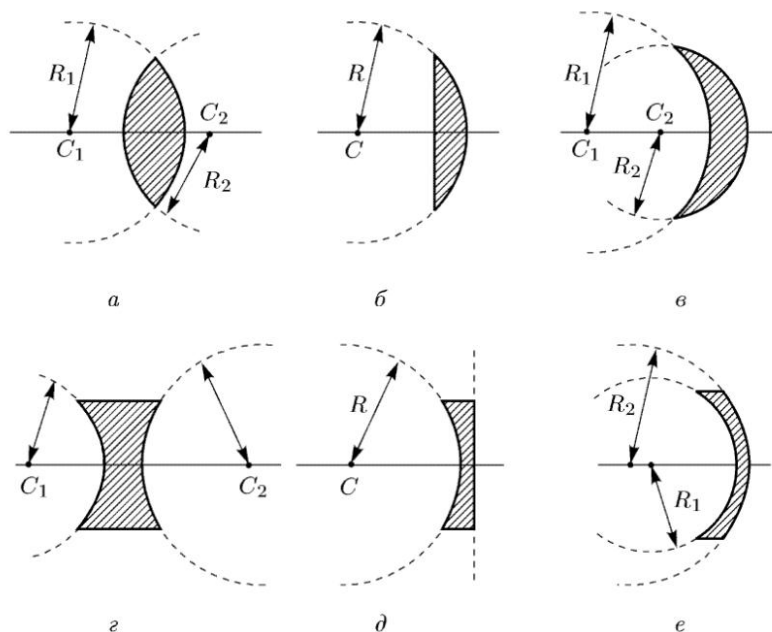


Рис. VIII.25

Линзы, у которых середина толще, чем края, называются *выпуклыми*, (рис. VIII.25 *a*, *b*, *в*); линзы, у которых края толще середины, называются *вогнутыми* (рис. VIII.25 *г*, *д*, *e*).

В зависимости от взаимного расположения сферических поверхностей, образующих линзу, различают следующие типы линз: двояковыпуклая (рис. VIII.25 *a*), плосковыпуклая (рис. VIII.25 *b*), вогнутовыпуклая (рис. VIII.25 *в*), двояковогнутая (рис. VIII.25 *г*), плосковогнутая (рис. VIII.25 *д*), выпукловогнутая (рис. VIII.25 *e*).

1.32. Линзы, преобразующие параллельный пучок лучей в сходящийся, называются *собирающими*. Если же линза преобразует параллельный пучок лучей в расходящийся пучок, то она называется *рассеивающей*. Все выпуклые линзы, изготовленные из вещества, оптически более плотного, чем окружающая среда, являются собирающими. Все вогнутые линзы, изготовленные из оптически более плотного вещества, чем окружающая среда, являются рассеивающими.

1.33. Если расстояние B_1B_2 между вершинами сферических сегментов, образующих линзу, мало по сравнению с радиусами сферических поверхностей R_1 и R_2 , то линза считается *тонкой* (рис. VIII.26 а, б).

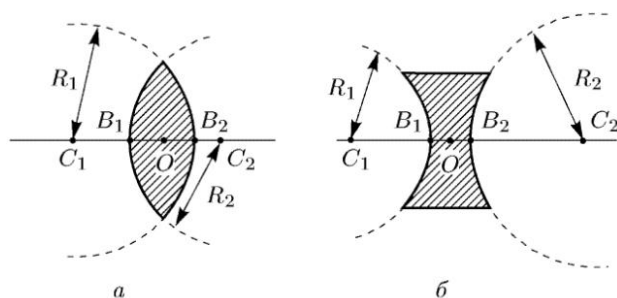


Рис. VIII.26

В элементарном курсе физики рассматриваются тонкие линзы. Кроме того, будем рассматривать только линзы, радиусы кривизны обеих поверхностей которых одинаковы.

1.34. Линия, соединяющая центры сферических поверхностей C_1 и C_2 , образующих линзу, называется *главной оптической осью* (рис. VIII.26 а, б и рис. VIII.27 а, б).

На главной оптической оси между вершинами сферических сегментов B_1 и B_2 есть точка O , через которую световые лучи проходят, не преломляясь. Эта точка называется *оптическим центром линзы* (рис. VIII.26 а, б).

Любая прямая, проходящая через оптический центр линзы, называется *побочной оптической осью*. Лучи, идущие вдоль побочной оптической оси проходят, не изменяя направления. Каждая линза имеет множество побочных оптических осей.

Лучи, идущие параллельно главной оптической оси, преломившись в собирающей линзе, собираются в одной точке на главной оптической оси, называемой *главным фокусом линзы* (точка F , рис. VIII.27 а).

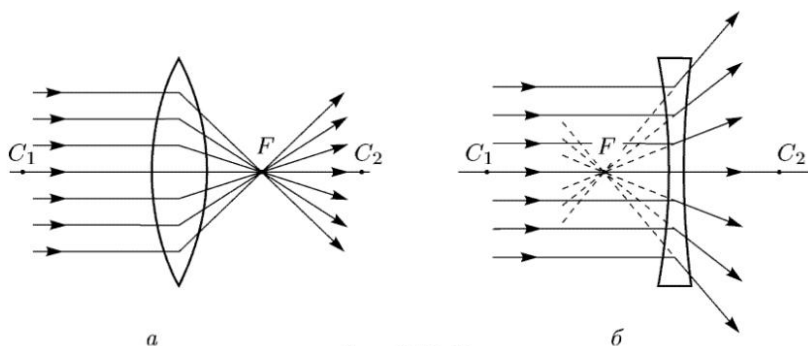


Рис. VIII.27

Пучок лучей, параллельных главной оптической оси рассеивающей линзы, после прохождения через линзу рассеивается. Но продолжения этих лучей пересекаются в одной точке на главной оптической оси, которая называется *главным фокусом рассеивающей линзы* (рис. VIII.27 б). Очевидно, что каждая линза имеет два фокуса по обе стороны от оптического центра. Главные фокусы собирающей линзы — действительные, а рассеивающей — мнимые. Расстояние от оптического центра линзы до ее главного фокуса называется *фокусным расстоянием*.

Плоскость, перпендикулярная главной оптической оси линзы на расстоянии, равном фокусному от линзы, называется *фокальной плоскостью*. Точка пересечения побочной оптической оси с фокальной плоскостью есть *побочный фокус линзы* (точки F' , рис. VIII.28 а, б).

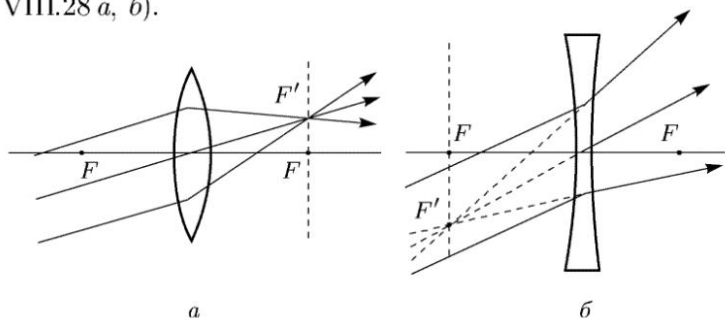


Рис. VIII.28

Если на линзу падают лучи, параллельные какой-либо побочной оптической оси, то после преломления в собирающей линзе они сходятся в соответствующем взятой оси побочном фокусе F' (рис. VIII.28 а); если линза рассеивающая, то лучи расходятся, но их продолжения пересекаются в соответствующем побочном фокусе F' (рис. VIII.28 б).

1.35. На рисунках, где изображается ход лучей в оптических системах, собирающие линзы изображаются для простоты так, как показано на рис. VIII.29 *a*, а рассеивающие — как на рис. VIII.29 *б*. Далее и будем их так изображать.

Чтобы построить изображение точки линзой, надо знать направление хода хотя бы двух лучей, исходящих из этой точки, после прохождения линзы. Точка пересечения этих лучей будет являться искомым изображением.

Для этих целей можно использовать следующие лучи, выходящие из точки S (рис. VIII.30 *a*, *б*):

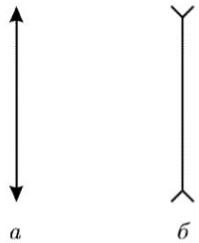


Рис. VIII.29

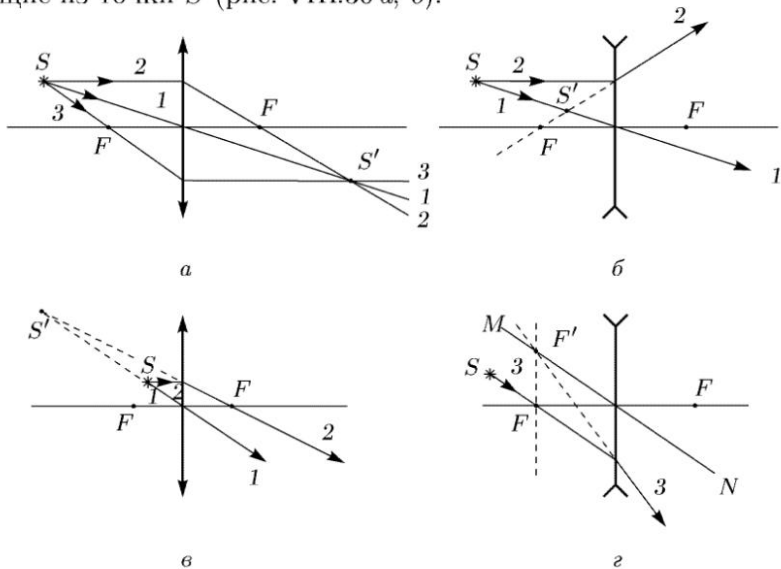


Рис. VIII.30

1 — луч, проходящий через оптический центр, не изменяет своего направления;

2 — луч, падающий на собирающую линзу параллельно главной оптической оси, после преломления проходит через фокус (рис. VIII.30 *a*); в рассеивающей линзе этот луч отклоняется от главной оптической оси так, что его продолжение проходит через передний фокус линзы (рис. VIII.30 *б*);

3 — луч, проходящий через фокус, после преломления собирающей линзой, идет параллельно ее главной оптической оси.

На рис. VIII.30 *a* приведено построение изображения, если источник света, точка S , находится на расстоянии, большем

фокусного от собирающей линзы, а на рис. VIII.30 в — на расстоянии, меньшем фокусного.

Для того чтобы построить ход луча, прошедшего через фокус рассеивающей линзы, надо поступить следующим образом (рис. VIII.30 г): параллельно лучу 3, проходящему через фокус, надо провести побочную оптическую ось MN , которая при пересечении фокальной плоскости даст мнимый побочный фокус F' . Луч 3 преломляется линзой так, что продолжение этого луча пройдет через побочный фокус F' . Обычно для построения изображения рассеивающей линзой используются только лучи 1 и 2.

В точке пересечения лучей, прошедших через линзу (или продолжений этих лучей), получается изображение точки S — точка S' . Если экран (лист бумаги, матовое стекло) расположить в месте, где должно быть изображение S' , то в случае действительного изображения на экране будет светлая точка (рис. VIII.30 а); при мнимом изображении на экране ничего не будет: изображение создается только за счет работы зрительного отдела мозга человека (рис. VIII.30 б, в).

Для точки, лежащей на главной оптической оси, при построении ее изображения все три указанных выше луча сливаются в один — тот, который идет вдоль главной оптической оси. Поэтому поступают следующим образом (рис. VIII.31). Луч 1 идет вдоль

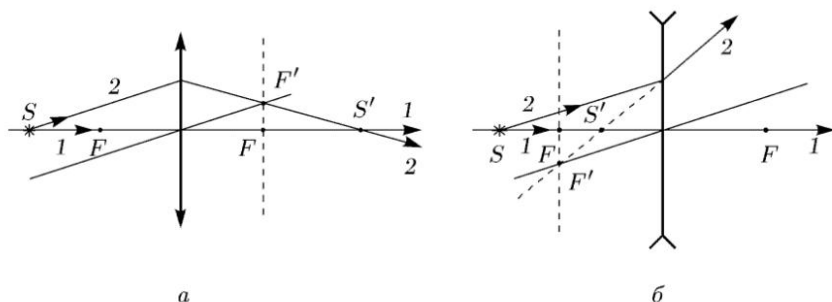


Рис. VIII.31

главной оптической оси, не меняя направления. Другой луч 2 из точки S проводят произвольно. Параллельно лучу 2 проводят побочную оптическую ось AB , которая пересекает фокальную плоскость в точке F' (в побочном фокусе).

После прохождения собирающей линзы луч 2 отклонится к оптической оси, пройдя через F' (рис. VIII.31 а). Точка его пересечения с лучом 1 (точка S') и будет действительным изображением точки S . После же прохождения рассеивающей линзы луч 2

отклонится от оптической оси так, что его продолжение пройдет через F' (рис. VIII.31 б). Точка S' пересечения луча 1 с продолжением за линзу луча 2 будет мнимым изображением точки S .

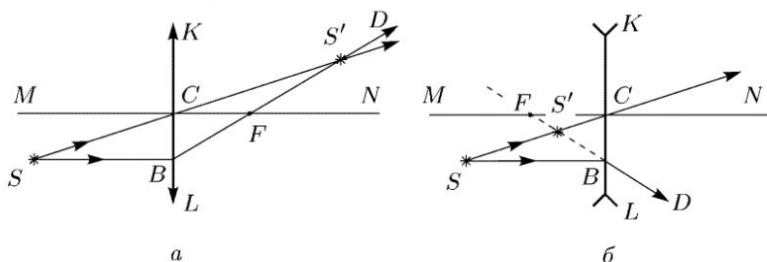


Рис. VIII.32

1.36. Проведем через точки S и S' прямую, которая является побочной оптической осью. Ее пересечение с осью MN даст точку C — оптический центр линзы (рис. VIII.32 а, б). Как принято, изобразим условно линзу отрезком прямой KL , перпендикулярным оси MN . Теперь проведем луч SB , параллельный главной оптической оси (рис. VIII.32 а, б). Этот луч, преломившись линзой, должен пройти через изображение точки S — через точку S' . В случае рис. VIII.32 а преломленный луч BD отклоняется к главной оптической оси и пересечет ее в точке F , которая есть фокус линзы (в данном случае собирающей). В случае рис. VIII.32 б продолжение преломленного луча BD пройдет через точку S' . Луч BD отклоняется от главной оптической оси MN , а его продолжение пересечет ось MN в точке F , которая является мнимым фокусом (то есть в данном случае линза является рассеивающей).

1.37. Вторая, четвертая, шестая.

1.38. Из принципа подобия треугольников, получающихся при построении изображений, даваемых линзами, можно получить формулу, называемую формулой тонкой линзы (рис. VIII.33 а, б):

$$\frac{1}{d} \pm \frac{1}{f} = \pm \frac{1}{F},$$

d — расстояние от предмета до линзы, f — расстояние от изображения до линзы, F — фокусное расстояние.

Формула справедлива как для собирающей, так и для рассеивающей линзы, надо только учесть следующее: знак «+» перед $1/f$ соответствует действительному изображению, знак «-» — мнимому: знак «+» перед $1/F$ соответствует собирающей линзе,

так как ее фокус действительный, а «-» — рассеивающей линзе (мнимый фокус).

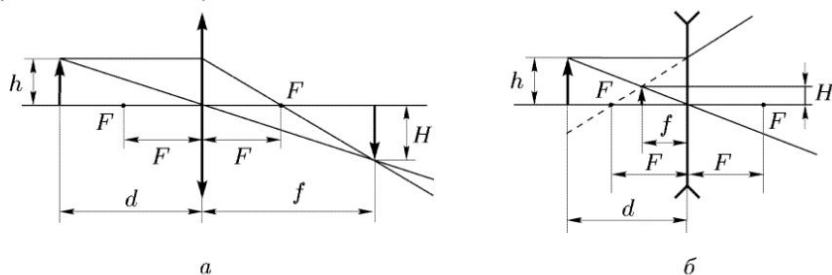


Рис. VIII.33

Иногда в задачах может речь идти о падении на линзу сходящегося пучка лучей (рис. VIII.34 а, б). В этом случае продолжения

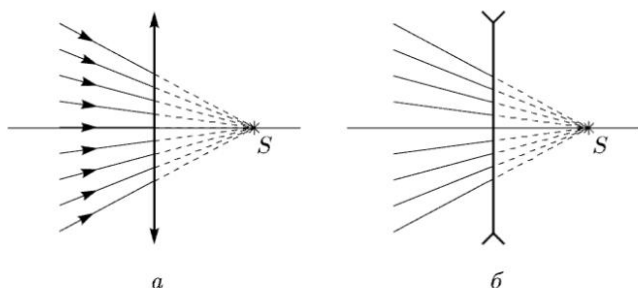


Рис. VIII.34

падающих лучей за линзу пересекутся в некоторой точке S , которая может считаться мнимым источником света. В таких случаях перед слагаемым « $1/d$ » ставится «-».

Формула линзы позволяет при заданном d найти величину f , при котором на экране получится четкое изображение предмета. Из рис. VIII.33 а видно, что если экран расположить от линзы на расстоянии, меньшем f , то лучи после линзы еще не сойдутся и вместо точки получится пятно. Если экран расположить на расстоянии, большем f , то лучи уже разойдутся и вместо точки опять будет пятно.

1.39. Фокусное расстояние линзы — это ее основная характеристика. Чем меньше фокусное расстояние линзы, тем сильнее преломляет она лучи, падающие на линзу.

Величина, обратная фокусному расстоянию линзы и определяющая ее преломляющие свойства, называется оптической силой линзы (D):

$$D = 1/F; \quad [D] = 1/\text{м}.$$

За единицу оптической силы линзы 1 диоптрия (сокращенно — дптр) принимается оптическая сила такой линзы, фокусное расстояние которой равно 1 м.

Для собирающих линз оптическая сила считается положительной (так как фокус действительный), а для рассеивающих линз — отрицательной (фокус, соответственно, мнимый).

1.40. Линейное увеличение линзы показывает, во сколько раз линейные размеры изображения H больше соответствующих размеров предмета h :

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d},$$

d — расстояние от предмета до линзы, f — от изображения до линзы (рис. VIII.33).

Иногда для оптических приборов, вооружающих глаз, используют понятие углового увеличения. Оно равно отношению углов зрения, под которыми глаз видит предмет через прибор (φ) и без него (φ_0):

$$\Gamma = \varphi / \varphi_0$$

(подробнее смотри в ответе на вопрос 1.45).

1.41. Изображение получится, но его яркость будет меньше.

1.42. Глаз представляет собой сложную оптическую систему, состоящую из ряда преломляющих сред. Глазное яблоко имеет почти правильную шарообразную форму (рис. VIII.35). Покрывает глазное яблоко плотной непроницаемой для света оболочкой — склерой — 1. На передней стороне склера переходит в прозрачную оболочку глаза, которая называется роговицей — 2. Она имеет

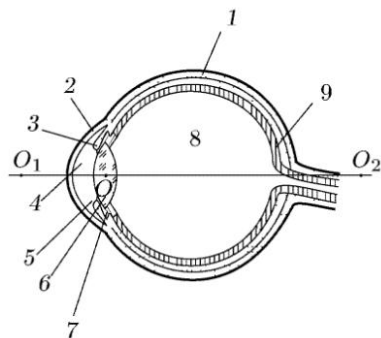


Рис. VIII.35

форму выпукловогнутой линзы с радиусом кривизны 7–8 мм. Между роговицей и радужной оболочкой — 3, окрашенной в какой-либо цвет и определяющей цвет глаз, находится водянистая жидкость — 4. В радужной оболочке имеется отверстие — 5, которое играет роль диафрагмы и называется зрачком. За зрачком располагается хрусталик — 6, который представляет собой прозрачное слоистое тело, имеющее форму двояковыпуклой линзы; показатель преломления хрусталика — 1,44. Хрусталик охватывает кольцевая мышца — 7, которая может менять кривизну его поверхностей, а, следовательно, и его оптическую силу.

Остальную часть глаза до задней стенки (глазного дна) занимает прозрачное полужидкое стекловидное тело — δ , показатель преломления которого примерно равен показателю преломления воды ($\approx 1,33$). Глазное дно покрыто сложной сетчатой оболочкой — θ , которая представляет собой разветвление зрительного нерва.

Роговица, хрусталик, стекловидное тело и жидкость передней камеры действуют вместе как одна собирающая двояковыпуклая линза. Оптический центр этой системы располагается внутри хрусталика около задней его поверхности (точка O). Главная оптическая ось глаза O_1O_2 проходит через вершину роговицы и оптический центр хрусталика (т. O). В отличие от тонкой линзы переднее и заднее фокусные расстояния глаза неодинаковы.

Рассматриваемые предметы находятся обычно на расстоянии, большем двойного фокусного расстояния глаза. Поэтому оптическая система создает на сетчатке действительное, уменьшенное и перевернутое изображение.

Окончательное формирование зрительных ощущений завершается в зрительном центре головного мозга. Благодаря жизненному опыту (с раннего детства) человек привыкает воспринимать уменьшенное и перевернутое изображение на сетчатке как прямое изображение натуральных размеров.

1.43. Четкое изображение предмета человек увидит только в случае, если изображение формируется оптической системой глаза на сетчатке (рис. VIII.36 *a*). Если же изображение формируется ближе или дальше сетчатки (рис. VIII.36 *б, в*), то вместо изображения любой точки рассматриваемого предмета получается пятно и четкость видения теряется.

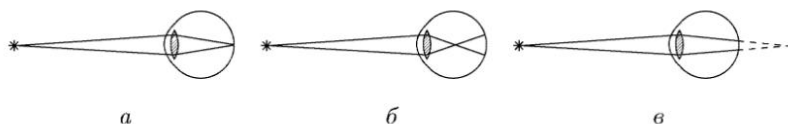


Рис. VIII.36

В соответствии с формулой линзы при изменении расстояния от предмета до линзы (d) изменяется и расстояние от линзы до изображения (f). При рассматривании разноудаленных предметов человеком расстояние d меняется, но расстояние от оптического центра глаза до сетчатки f остается неизменным. Поэтому четкое изображение на сетчатке может получиться только при изменении оптической силы глаза ($1/F$). Это происходит посредством рефлекторного изменения кривизны хрусталика и, соответственно, его оптической силы. Способность глаза изменять

свою оптическую силу (или фокусное расстояние) для получения резкого изображения разноудаленных предметов называется аккомодацией глаза.

Аккомодация происходит за счет действия кольцевой мышцы, охватывающей хрусталик. Изображение предметов, находящихся очень далеко от глаза, получается на сетчатке без напряжения кольцевой мышцы. Если предмет приближается к глазу, то кольцевая мышца, сдавливая хрусталик, увеличивает его кривизну (уменьшает фокусное расстояние). В результате этого резкость изображения на сетчатке сохраняется. Однако приближать предмет к глазу можно лишь до определенного расстояния, так как аккомодация имеет предел. Нормальный глаз видит наибольшее число деталей и при этом меньше напрягается при расстоянии примерно до 25 см. Это расстояние называется *расстоянием наилучшего зрения*.

1.44. Для хорошего рассматривания предмета должна быть наиболее благоприятная для глаза освещенность. Освещенность предметов в естественных условиях меняется в широких пределах. Недостаточная или, наоборот, слишком большая освещенность приводит к быстрому утомлению глаза. Поэтому глаз автоматически регулирует свою чувствительность к свету. Процесс приспособления глаза к рассматриванию предметов при различной освещенности называется адаптацией глаза. Адаптация происходит за счет изменения диаметра зрачка: если освещенность плохая, то зрачок расширяется и большее количество света достигает светочувствительного слоя сетчатки. При сильной освещенности диаметр зрачка, наоборот, уменьшается. Таким образом, глаз при изменении площади зрачка регулирует количество световой энергии, попадающей в него. Кроме того, чувствительность глаза к свету изменяется за счет перемещения непрозрачных клеток сетчатки, которые защищают светочувствительные элементы зрительного нерва от сильной освещенности.

1.45. Угол φ , образованный лучами, соединяющими края предмета с оптическим центром глаза, называется углом зрения. Из рис. VIII.37 видно, что размер изображения на

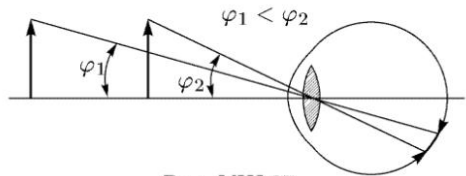


Рис. VIII.37

сетчатке зависит от угла зрения, под которым рассматривается предмет. Наименьший угол зрения, при котором глаз воспринимает две точки предмета отдельно, называется предельным

углом зрения. Его величина примерно равна одной минуте ($1'$). Изображения этих точек должны попадать на разные окончания зрительного нерва. Если же угол зрения настолько мал, что изображения двух разных точек предмета попадают на одно нервное окончание, то эти точки глаз воспринимает как одну. Поэтому для рассматривания на предмете мелких деталей необходимо увеличить угол зрения, под которым рассматривается предмет.

1.46. При близорукости глаз в ненапряженном состоянии создает изображение предмета не на сетчатке, в перед ней (рис. VIII.38 *a*). Для того, чтобы изображение получилось на сетчатке (то есть чтобы больше стало расстояние от хрусталика до изображения — в соответствии с формулой линзы увеличилось f), надо рассматриваемый предмет приблизить к глазу (уменьшить величину d). Поэтому указанный дефект зрения называется близорукостью.

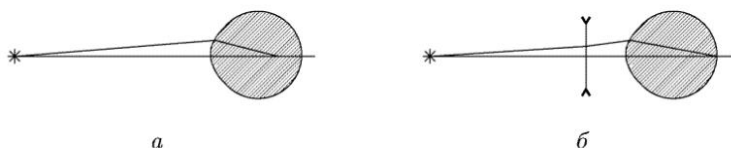


Рис. VIII.38

Для устранения близорукости необходимо уменьшить оптическую силу хрусталика, чтобы он слабее преломлял лучи и они фокусировались на сетчатке. Для этого перед роговицей надо расположить рассеивающую линзу (рис. VIII.38 *б*). Проходя через рассеивающую линзу, лучи несколько расходятся и изображение предмета попадает на сетчатку глаза. Поэтому для коррекции близорукости используют очки с «минусовыми» диоптриями.

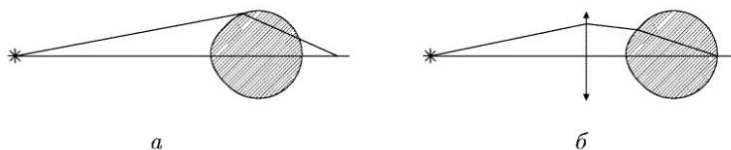


Рис. VIII.39

1.47. При дальнозоркости ненапряженный глаз создает изображение за сетчаткой (рис. VIII.39 *a*). В этом случае для того, чтобы изображение получилось на сетчатке (для уменьшения f), надо рассматриваемый предмет удалить от глаза (увеличить d). Поэтому дефект зрения в этом случае называется дальнозоркостью. Чтобы скорректировать дальнозоркость, перед глазом надо поместить собирающую линзу (рис. VIII.39 *б*).

Собирающая линза несколько сближает лучи и изображение получается на сетчатке. Поэтому для коррекции дальновзоркости используют очки с «плюсовыми» диоптриями.

1.48. При рассматривании близких предметов.

1.49. Линзы собирающие. Дальновзоркость.

1.50. Оптическая сила системы, состоящей из нескольких тонких линз, сложенных вплотную, равна сумме оптических сил всех линз:

$$D = D_1 + D_2 + \dots + D_n,$$

n — число линз.

В соответствии с этим оптическая сила D системы очки — глаз

$$D = D_o + D_r,$$

D_o — оптическая сила очковой линзы, D_r — глаза.

1.51. Надо получить на стене резкое изображение нити лампы с помощью обеих линз. Та линза, которая расположена ближе к стене, имеет большую оптическую силу.

1.52. Оптическая сила системы вплотную сложенных линз D равна сумме $D = D_1 + D_2$, D_1 , D_2 — оптические силы каждой линзы. Поэтому надо поступить следующим образом: положить одну линзу на другую так, чтобы совпали их оптические оси. Если эта система линз собирает лучи, то оптическая сила собирающей линзы больше, если же система линз рассеивает лучи, то оптическая сила больше у рассеивающей линзы. Если же оптические силы линз одинаковы, то система линз будет вести себя как плоскопараллельная пластинка.

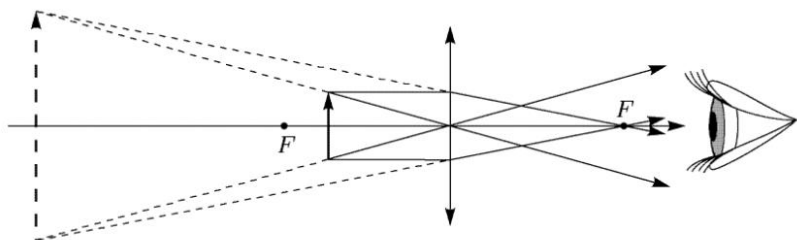


Рис. VIII.40

1.53. Лупа является простейшим оптическим прибором. Она представляет собой собирающую линзу или совокупность нескольких линз с малым фокусным расстоянием. Лупу обычно располагают вблизи глаза, а предмет — вблизи фокальной плоскости лупы ближе к лупе (рис. VIII.40).

Лупа дает мнимое, прямое, увеличенное изображение предмета. Глаз обычно располагают так, чтобы изображение получилось примерно на расстоянии наилучшего зрения $f = L = 25$ см. Так как предмет располагают вблизи фокальной плоскости, то $d \approx F$. Пользуясь формулой, записанной в ответе на вопрос 1.40, можно получить формулу для увеличения лупы:

$$\Gamma = L/F.$$

С уменьшением фокусного расстояния увеличение лупы возрастает. Но лупы с увеличением более 40 дают значительные искажения, поэтому обычно применяют лупы, дающие увеличение от 2,5 до 25.

Основные формулы

Закон преломления:

$$n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}, \quad (1.1)$$

n_{21} — относительный показатель преломления второй среды по отношению к первой, α — угол падения, β — угол преломления.

Относительный показатель преломления связан со скоростями света v_1 и v_2 в первой и второй средах следующим образом:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (1.2)$$

Если первой средой является воздух (или вакуум), то показатель преломления второй среды, вычисленный по формулам (1.1) и (1.2), называется абсолютным показателем преломления. Так как скорость света в воздухе и вакууме равна $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, то абсолютный показатель преломления среды равен:

$$n = \frac{c}{v}, \quad (1.3)$$

v — скорость света во второй среде.

Связь относительного показателя преломления двух сред с их абсолютными показателями имеет вид:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (1.4)$$

Во всех справочных таблицах даны абсолютные показатели преломления веществ; при этом слово «абсолютный» в большин-

стве случаев опускают. Если в задаче речь идет о показателе преломления какой-либо среды, то имеется в виду ее абсолютный показатель преломления.

Формула линзы:

$$\pm \frac{1}{F} = \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f}, \quad (1.5)$$

F — фокусное расстояние линзы, d — расстояние от источника света до линзы, f — расстояние от линзы до изображения. Знак «+» перед $1/F$ соответствует собирающей линзе (фокус действительный), а «-» — рассеивающей линзе (фокус мнимый). Для линз в основном будем рассматривать действительные источники света, из каждой точки которых лучи идут расходящимся пучком. Это соответствует знаку «+» перед членом $1/d$. Если же по условию задачи на линзу падает сходящийся пучок лучей, то источник света считают мнимым и перед $1/d$ ставят «-». Находится мнимый источник света в точке, где сходятся продолжения лучей за линзу.

Увеличение линзы:

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}, \quad (1.6)$$

h — линейные размеры предмета, H — соответствующие линейные размеры изображения.

Оптическая сила линзы:

$$D = \pm \frac{1}{F}, \quad (1.7)$$

знак «+» соответствует собирающей линзе, «-» — рассеивающей.

Если несколько тонких линз сложены вплотную, то оптическая сила этой системы линз D равна сумме

$$D = D_1 + D_2 + \dots + D_n \quad (1.8)$$

n — число линз (значения оптических сил брать с соответствующими знаками).

