



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Рубцовский индустриальный институт (филиал)
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова»

В.В. БОРИСОВСКИЙ

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА (теория и практика)

Учебное пособие для студентов
технических направлений всех форм обучения

*Рекомендовано Рубцовским индустриальным институтом (филиалом) ФГБОУ
ВПО «Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова» в качестве учебного пособия для студентов,
обучающихся по техническим направлениям»*

Рубцовск 2015

УДК 530.1

Борисовский В.В. Геометрическая оптика (теория и практика): Учебное пособие для студентов технических направлений всех форм обучения/ Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2015.- 55 с.

Пособие представляет собой краткую теорию распространения световых лучей в различных средах и оптических системах. Рассматриваются примеры и вопросы, которые возникают в природе и технике. Даны подсказки и подробные ответы на все вопросы.

Рассмотрено и одобрено на заседании
НМС Рубцовского индустриального
института.
Протокол №4 от 21.05.15.

Рецензент: к.т.н., доцент

Гончаров С.А.

© Рубцовский индустриальный институт, 2015

Содержание

Введение	4
I. Оптическое излучение	6
1.1. Свойства световой волны	6
1.2. Фотометрические характеристики света	7
II. Геометрическая оптика	10
2.1. Законы распространения световых лучей	10
2.2. Плоские и сферические зеркала	11
2.3. Тонкие линзы	13
2.4. Глаз человека	16
III. Вопросы и задачи	18
IV. Подсказки	29
V. Ответы	32

Введение

Способность видеть чрезвычайно важна, ибо зрение позволяет получать значительную часть информации об окружающем нас мире. Как мы видим? Что представляет собой то, что мы называем светом, который, попадая в наш глаз, вызывает зрительные ощущения? Что такое свет? Каким образом с его помощью нам удастся видеть тот необычайно широкий диапазон явлений, которые мы наблюдаем? На все эти вопросы человечество в течение многих столетий пыталось получить ответ. В истории физики исследования природы и свойств света занимают одно из ведущих мест. В развитии представлений о свете с древних времен и до наших дней прослеживается преемственность физической науки, ее важнейших законов и теорий. Раздел физики, в котором исследуется природа света (оптического излучения), его распространение и явления, наблюдаемые при взаимодействии света с веществом, получил название оптика.

Оптика – древнейшая наука; прямолинейность распространения света была известна еще в Месопотамии и Древнем Египте и использовалась при строительных работах. Изучением возникновения изображений от зеркал занимались древнегреческие ученые и философы Аристотель (384-322 до н.э.), Платон (425-347 до н.э.), Евклид (III век до н.э.). Законы преломления и отражения света (геометрическая оптика) были открыты в Средние века голландским ученым В. Снеллиусом (Снеллом) (1580-1625), французским физиком и математиком Р. Декартом (1596-1650), итальянским физиком и астрономом Г. Галилеем (1564-1642). На основании законов геометрической оптики были созданы оптические приборы: лупы, линзы, микроскопы, телескопы, очки, фотоаппараты и другие оптические приборы.

Первые предположения о том, что такое свет, сделал два с половиной тысячелетия тому назад греческий философ и математик Пифагор (580-500 до н.э.). Он выдвинул гипотезу о том, что тела испускают мельчайшие частицы, которые попадают в глаз и позволяют человеку видеть окружающий его мир. Эта гипотеза просуществовала больше двух тысячелетий, и только в 1672 году она была существенно видоизменена английским ученым И. Ньютоном (1643-1727), взявшим за основу теории прямолинейность распространения света в однородной прозрачной среде. Свет, по этой теории, состоял из мельчайших частиц – корпускул. Корпускулярная теория И. Ньютона объясняла уже известные в то время законы отражения и преломления механическим способом, например, отражение света рассматривалось как отражение упругих шаров при ударе о плоскость.

Прогресс в развитии представлений о природе света в существенной степени определялся работами современников И. Ньютона – английского физика Р. Гука (1635-1703) и голландского физика и математика Х. Гюйгенса (1629-1695). В 1690 году Х. Гюйгенс предложил волновую теорию, согласно которой свет – это упругие волны, распространяющиеся в особой, гипотетической среде – эфире, заполняющем все пространство и проникающим внутрь всех тел. Однако ни корпускулярная, ни волновая теории не имели экспериментального подтверждения. Такое неопределенное положение относительно природы света

длилось до начала XIX века, когда волновая теория в результате исследования интерференции света английским ученым Т. Юнгом (1771-1829) и французским физиком Ю. Френкелем (1788-1827) стала доминирующей в физике. Особенно после того, как в 1864 году английский физик Д. Максвелл (1831-1879) доказал, что свет – это электромагнитные волны определенного диапазона, а немецкий физик Г. Герц (1857-1894) установил экспериментально, что свет при распространении ведет себя как электромагнитная волна. Таким образом, к концу XIX столетия ни у кого не было сомнения, что свет – это волна.

Однако в начале XX века мир физики потрясло открытие, которое коренным образом изменило представление о природе света. Выяснилось, что отвергнутая корпускулярная теория все же существует. В 1900 году немецкий физик-теоретик М. Планк (1858-1947) при выводе закона теплового излучения выдвинул гипотезу о том, что электромагнитное излучение, и свет в том числе, могут распространяться отдельными порциями – квантами – подобно потоку частиц. Исследования внешнего фотоэффекта, давления света и эффекта Комптона доказали справедливость гипотезы М. Планка.

Возникла ситуация, когда явления интерференции и дифракции можно было объяснить, считая свет волной, а явления излучения и поглощения – считая свет потоком частиц – квантов. Следовательно, свет имеет двойственную природу; появилась корпускулярно-волновая теория или просто квантовая теория света.

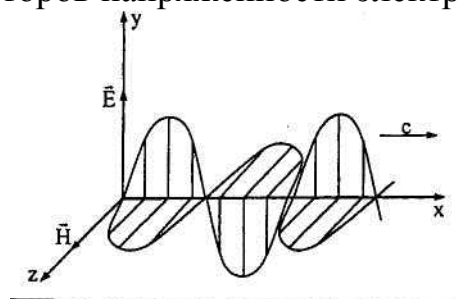
В дальнейшем выяснилось, что двойственность присуща не только свету, но и любой другой форме материи.

I. Оптическое излучение

Оптическое излучение или просто свет представляет собой сложное явление: в одних случаях – это электромагнитная волна, в других – поток особых частиц – фотонов (или квантов).

1.1. Свойства световой волны

Современная квантовая теория света рассматривает свет как поток частиц (фотонов), распространяющихся в вакууме и средах по законам перемещения электромагнитных волн. В электромагнитной волне происходят колебания векторов напряженности электрического поля \vec{E} и напряженности магнитного поля \vec{H} .



Колебания векторов \vec{E} и \vec{H} происходят в двух взаимно перпендикулярных плоскостях в одной и той же фазе (синфазно) (рис.1).

Все исследования и наблюдения показали, что действие света определяется в основном электрической составляющей электромагнитного поля, поэтому вектор напряженности \vec{E} называют **световым вектором**. Изменение во времени и пространстве проекции светового вектора на направление, вдоль которого он колеблется, описывается уравнением

$$E = E_0 \sin\left(\omega t - \frac{\omega x}{c} + \varphi\right), \quad (1.1)$$

где E_0 – амплитуда, ω – круговая (циклическая) частота, c – скорость распространения волны, φ – начальная фаза волны.

Скорость распространения световой волны в вакууме $c_0 = 3 \cdot 10^8$ м/с, в любой среде в n раз меньше $c = c_0/n$, где n – абсолютный показатель преломления этой среды. Самое большое значение показателя преломления у алмаза, оно равно $n=2,42$, у стекла – $1,515$, у воды – $1,33$, у воздуха – $1,000292$. Значения показателя преломления характеризуют **оптическую плотность** среды. Среда с большим n называется оптически более плотной, с меньшим – менее плотной.

К видимой области оптического излучения относятся электромагнитные волны с длиной $\lambda_0 = (0,38 \div 0,77)$ мкм. Эти значения относятся к световым волнам в вакууме.

Так как частота колебаний ν при переходе волны из одной среды в другую не меняется, то длина волны в вакууме равна $\lambda_0 = \frac{c_0}{\nu}$, а в среде – $\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{c_0}{n\nu} = \frac{\lambda_0}{n}$. Следовательно, длина световой волны в среде с показателем преломления n связана с длиной волны в вакууме соотношением

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}. \quad (1.2)$$

Частоты видимого излучения лежат в пределах $\nu = (0,39 \div 0,79) \cdot 10^{16}$ Гц.

Поток энергии, переносимый световой волной, через единицу площади носит название **интенсивности света** J в данной точке пространства. Интенсивность света пропорциональна показателю преломления среды n и квадрату амплитуды световой волны

$$J \sim nE_0^2. \quad (1.3)$$

Линия, вдоль которой распространяется световая энергия, называется **лучом**. Так как световые волны поперечные, то колебания светового вектора происходят в направлениях, перпендикулярных к лучу. При этом у светового излучения, испускаемого обычными источниками, в результирующей волне колебания различных направлений относительно луча представлены с равной вероятностью. Такой свет, у которого колебания светового вектора \vec{E} относительно луча происходят одинаково во всех направлениях, называется **естественным**. Если же окажется, что в различных точках вдоль луча все векторы \vec{E} лежат в одной плоскости, то излучение называется **плоскополяризованным**.

Реальное излучение тел содержит в себе не одну определенную частоту колебаний, а некоторый набор различных частот, называемый **спектром** или спектральным составом данного излучения. Излучение называется монохроматическим, если оно содержит очень узкий интервал частот $\Delta\nu$ (или длин волн $\Delta\lambda$). В видимой области монохроматическое излучение вызывает световое ощущение определенного цвета; например, излучение, охватывающее интервал длин волн от 0,55 до 0,56 мкм, воспринимается как зеленый цвет.

1.2. Фотометрические характеристики света

Свет, распространяясь в вакууме и средах в виде электромагнитных волн, несет с собой запас энергии. Эта энергия воспринимается и измеряется по ее воздействию на различные приемники излучения, в которых происходит превращение этой энергии в другие виды. В качестве приемников излучения применяются термоэлементы, фоточувствительные слои, фотоэлементы, но среди них особое значение имеет такой приемник, как человеческий глаз. Раздел оптики, занимающийся методами измерения световой энергии и определением величин, связанных с ней, получил название **фотометрия**.

В фотометрии используются энергетические (объективные) характеристики, которые определяют энергетические параметры оптического излучения безотносительно к его действию на приемники излучения. Однако для прикладной светотехники существенны не только энергетические характеристики света, но и мера воздействия света на глаз наблюдателя. Это воздействие определяется визуальными (субъективными или световыми) характеристиками. Таким образом, в фотометрии приходится вводить двойные единицы измерения: энергетические и визуальные.

В большинстве оптических измерений приемником энергии света является человеческий глаз, а также фоточувствительные слои и фотоэлементы. Действие света на глаз (световые ощущения) в сильной степени зависит от длины волны. Чувствительность среднего нормального человеческого глаза к излу-

нию различной длины волны дается кривой относительной спектральной чувствительности $K_\lambda = \frac{V_\lambda}{V_0}$ (функция видимости) (рис.2). Спектральная чувствительность глаза $V_\lambda = \frac{d\Phi_\lambda}{dP_\lambda}$, где $d\Phi_\lambda$ – монохроматический световой поток, приходящийся на длину волны λ , который измеряется в люменах (лм), dP_λ – поток энергии, содержащийся в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$. Наибольшей чувствительностью глаз обладает для $\lambda_0=0,555$ мкм (зеленая часть спектра) $V_0=682$ лм/Вт. Это означает, что монохроматический лучистый поток, содержащий излучение с длиной волны около 0,555 мкм мощностью 1 Вт, воспринимается как световой поток зеленого света, равный 682 лм.

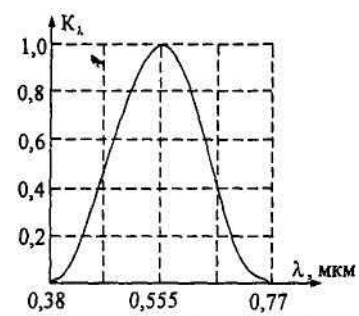


Рис. 2.

Зная спектральную плотность излучения на данном участке спектра $\varphi_\lambda = \frac{dP_\lambda}{d\lambda}$, можно найти **световой поток** Φ , испускаемый источником света; это есть лучистый поток dP_λ , спектральная плотность которого φ_λ в каждом монохроматическом участке от λ до $\lambda + d\lambda$, умноженная на V_λ . Так как за пределами видимого спектра (от $\lambda_1=0,38$ мкм до $\lambda_2=0,77$ мкм) чувствительность глаза равна нулю, то световой поток равен:

$$\Phi = \int_{0,38 \text{ мкм}}^{0,77 \text{ мкм}} K_\lambda V_\lambda \varphi_\lambda d\lambda. \quad (1.4)$$

Следовательно, световой поток Φ – это мощность видимого излучения, определяемая по зрительному ощущению человеческого глаза.

Если известен световой поток, испускаемый источником света, то можно определить фотометрические характеристики этого источника.

1. Сила света. Источник света, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстоянием до точки наблюдения, является точечным. Свет, излучаемый в однородной среде точечным источником, будет распространяться в виде сферического фронта волны. Для характеристики точечных источников применяется **сила света** I , которая определяется как отношение светового потока $d\Phi$, испускаемого источником света внутрь телесного угла $d\Omega$, к величине этого угла (рис.3):

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}. \quad (1.5)$$

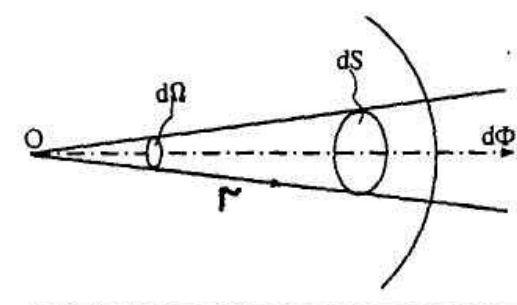


Рис 3

Телесный угол – это часть пространства, ограниченная некоторой конической поверхностью. Значение телесного угла равно отношению площади dS части сферы, вырезанной конической поверхностью с вершиной в центре сферы O (рис.3) к квадрату радиуса r этой сферы. Единица измерения телесного угла (в СИ) – стерадиан (ср). Сила света измеряется в канделах. Кандела (кд) является одной из основных единиц Международной системы (СИ), $1 \text{ кд} = \frac{1 \text{ лм}}{1 \text{ ср}}$.

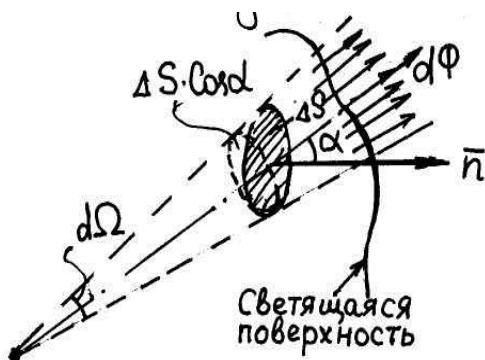


Рис. 4.

2. Яркость. Яркость применяется для характеристики протяженных источников света и поверхностей, отражающих падающий на них свет. Если элементарный телесный угол $d\Omega$ опирается на светящуюся площадку dS и ориентирован в направлении угла α к нормали \vec{n} (рис.4), то сила света площадки ΔS равна $\Delta I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$, где $d\Phi$ – световой поток, распространяющийся в пределах телесного угла $d\Omega$. Проекция площадки ΔS на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения, будет равна $\Delta S \cos \alpha$. Тогда яркость определяется отношением силы света в данном направлении к поверхности источника, видимой по этому направлению:

$$B = \frac{\Delta I}{\Delta S \cos \alpha} = \frac{d\Phi}{d\Omega \Delta S \cos \alpha}. \quad (1.6)$$

Для многих источников света яркость неодинакова для разных направлений, но есть источники света, у которых сила света изменяется в зависимости от угла α по закону немецкого ученого Ламберта И.Г. (1728-1777):

$$I_\alpha = I_0 \cos \alpha, \quad (1.7)$$

где I_α – сила света в направлении угла α , I_0 – сила света в нормальном направлении, α – угол между нормалью к светящейся площадке и направлением светового пучка.

Излучатели, подчиняющиеся закону Ламберта, называются косинусными, или **ламбертовыми**, излучателями. Для них яркость во всех направлениях одинакова. Строго следует закону Ламберта абсолютно черное тело, ближе всего к ламбертовым источникам можно отнести плафоны из молочного стекла.

Яркость светящейся поверхности измеряется в канделах на квадратный метр ($\text{кд}/\text{м}^2$). Раньше эта единица назвалась нит (нт). Яркость листа бумаги при чтении и письме должна быть не менее $10 \text{ кд}/\text{м}^2$; яркость поверхности Солнца – $10^9 \text{ кд}/\text{м}^2$; нити накаливания электрической лампочки – $10^6 \text{ кд}/\text{м}^2$; яркость неба в безлунную ночь – $10^{-4} \text{ кд}/\text{м}^2$. Наименьшая яркость светящихся поверхностей, воспринимаемая глазом в полной темноте, – $10^{-5} \text{ кд}/\text{м}^2$ – называется пороговой яркостью для человеческого глаза.

3. Светимость. Протяженный источник света можно характеризовать светимостью R различных его участков. Светимость поверхности источника света площадью dS определяется отношением светового потока $d\Phi_{\text{исп}}$ испускаемого площадью dS по всем направлениям, к величине этой площадки:

$$R = \frac{d\Phi_{\text{исп}}}{dS}. \quad (1.8)$$

Единицей светимости является люмен на квадратный метр ($\text{лм}/\text{м}^2$).

Светимость R и яркость B ламбертового источника света связаны между собой соотношением

$$R = \pi B. \quad (1.9)$$

4. Освещенность. Освещенностью поверхности E называется величина, измеряемая отношением светового потока $d\Phi_{\text{пад}}$, падающего на поверхность dS , к величине поверхности dS

$$E = \frac{d\Phi_{\text{пад}}}{dS}. \quad (1.10)$$

Единицей освещенности является люкс (лк), равный освещенности, создаваемый потоком в 1 лм, равномерно распределенным по поверхности площадью в 1 м²: 1 лк=1лм/1 м².

Освещенность E , создаваемую точечным источником, можно выразить через силу света I , расстояние r от поверхности до источника и угол α между нормалью (перпендикуляром) к поверхности и направлением на источник:

$$E = \frac{I \cos \alpha}{r^2}. \quad (1.11)$$

Все рассмотренные характеристики описывают видимое излучение.

II. Геометрическая оптика

Длины воспринимаемых глазом световых волн очень малы (порядка 10⁻⁷ м). Поэтому распространение видимого излучения можно рассматривать, отвлекаясь от волновой природы, считая, что свет распространяется вдоль линий, которые называются *лучами*. Этот идеализированный световой луч является геометрической линией, вдоль которой распространяется свет. Раздел оптики, в котором не учитываются волновые свойства света, а учитывается только направление распространения, называется *геометрической оптикой*.

При решении ряда задач по оптике, используя положения геометрической оптики, рассматривают свойства световых лучей и на основе их поведения строят изображения в различных оптических приборах. В основе формального построения в геометрической оптике лежат четыре закона, установленные опытным путем: 1) закон прямолинейного распространения света; 2) закон независимости световых пучков; 3) закон отражения и 4) закон преломления света.

2.1. Законы распространения световых лучей

Согласно закону прямолинейного распространения, свет в прозрачной однородной среде распространяется по прямым линиям. Доказательством этого закона могут служить резкие тени, отбрасываемые непрозрачными телами при освещении их точечными источниками света.

Закон независимости световых пучков состоит в том, что распространение всякого светового пучка в среде совершенно не зависит от того, есть в этой среде другие пучки или нет. Если же несколько пучков освещают поверхность, то по закону независимости освещенность поверхности равна сумме освещенностей, создаваемых каждым пучком в отдельности.

При падении луча света на плоскую границу раздела двух прозрачных сред он частично проходит во вторую среду (преломляется), частично отражается. При отражении света от границы раздела двух сред угол падения α равен

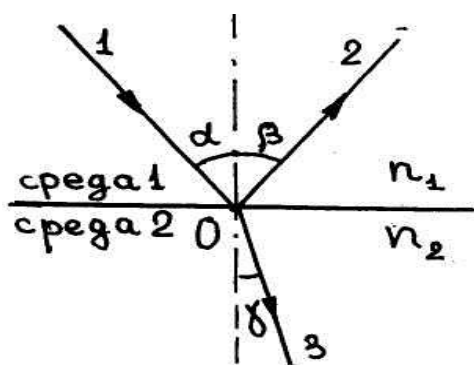


Рис. 5

углу отражения β (рис.5). Углом падения называют угол α между падающим лучом 1 света и перпендикуляром к границе раздела двух сред, восстановленным в точке падения O , угол отражения – это угол β между отраженным лучом 2 и перпендикуляром (рис.5).

Закон отражения, известный с древних времен, утверждает, что *падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости с перпендикуляром (нормалью) к границе раздела в точке падения* (эта плоскость называется

плоскостью падения).

При падении лучей света на идеальную отражающую плоскую поверхность раздела двух сред наблюдается *зеркальное отражение*, при котором отражающая свет поверхность невидима, видимы только источники световых лучей. При падении параллельного пучка лучей на шероховатую поверхность наблюдается *диффузное* или *рассеянное отражение*, при котором отражающая поверхность становится видимой.

Закон преломления был найден экспериментально в 1621 году голландским ученым В. Снеллиусом (1580-1626). Согласно закону преломления Снеллиуса, преломленный луч 3 лежит в плоскости, проведенной через падающий луч 1 и перпендикуляр к границе в точке O , а отношение синуса угла падения α к синусу угла преломления γ для данных сред не зависит от угла падения α , не зависит от длины волны света:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}, \quad (2.1)$$

где n_1 – показатель преломления первой среды, n_2 – показатель преломления второй среды, n_{21} – относительный показатель преломления среды 2 относительно среды 1.

Если $n_1 > n_2$, то есть луч света идет из оптически более плотной среды в менее плотную, то при некоторых условиях преломленный луч исчезает и свет полностью отражается от границы раздела двух сред. Это явление называется *полным внутренним отражением*. Оно характеризуется предельным углом полного отражения $\alpha_{\text{пр}}$; это угол падения α , когда угол преломления γ достигает значения 90° :

$$\frac{\sin \alpha_{\text{пр}}}{\sin 90^\circ} = \sin \alpha_{\text{пр}} = \frac{n_2}{n_1}, \quad \alpha_{\text{пр}} = \arcsin \frac{n_2}{n_1}. \quad (2.2)$$

Если $\alpha > \alpha_{\text{пр}}$, то происходит полное внутреннее отражение. Например, для границы стекло-воздух $\alpha_{\text{пр}} = 42^\circ$ и все лучи, которые падают под углом больше 42° , полностью отражаются.

2.2. Плоские и сферические зеркала

Закон отражения света применяется в оптических системах, которые называются зеркалами. Если параллельный пучок лучей, падающих на плоскую

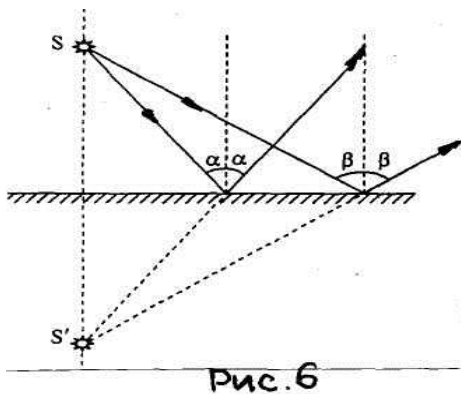


Рис. 6

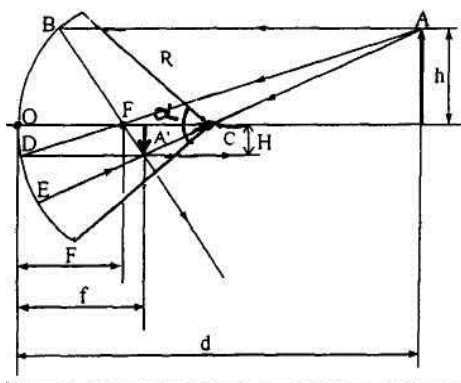


Рис. 7.

поверхность раздела двух сред, после отражения остается параллельным, отражение называется зеркальным, а сама поверхность называется плоским зеркалом. Плоское зеркало, представляющее собой гладкую поверхность, создает мнимое (кажущееся) изображение (рис.6). Предмет S и его изображение S' расположены симметрично по отношению к поверхности зеркала.

Если зеркально отражающая поверхность представляет собой часть шаровой поверхности, то такое зеркало называется сферическим (рис.7). Центр сферической поверхности – точку C – называют оптическим центром зеркала, ее радиус R – радиусом зеркала. Вершина шарового сегмента O называется полюсом зеркала, угол α , под которым этот сегмент виден из оптического центра, – угловым отверстием (апертурой) зеркала. Прямая, проходящая через оптический центр зеркала C, называется оптической осью. Оптическая ось, проходящая через полюс зеркала O, называется главной, а остальные – побочными оптическими осями.

Лучи, параллельные главной оптической оси, после отражения от сферического вогнутого зеркала собираются в одной точке F, называемой **фокусом зеркала** (рис.7). Расстояние от полюса зеркала O до фокуса F называется **фокусным расстоянием F**. Фокусное расстояние связано с радиусом кривизны зеркала R соотношением

$$F = \frac{R}{2}. \quad (2.3)$$

Для параксиальных световых пучков, то есть лучей света, образующих узкий конус с осью, справедлива формула сферического зеркала

$$\frac{1}{F} = \frac{2}{R} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}, \quad (2.4)$$

где d – расстояние от зеркала до предмета (источника света), f - расстояние от зеркала до изображения.

Величины d и f считаются положительными, если они отсчитаны от полюса зеркала O в направлении распространения света, и отрицательным – в противоположном направлении.

При построении изображений в сферическом зеркале следует руководствоваться следующими тремя правилами: 1) луч, параллельный главной оптической оси, после отражения в зеркале проходит через фокус (луч АВА'); 2) луч, проходящий через фокус, после отражения идет параллельно главной оптической оси (луч AD); 3) луч, проходящий через центр кривизны зеркала, при отражении совмещается с самим собой (луч ACE). Эти три луча, испущенные из одной точки (рис.7) предмета (источника), после их отражения в зеркале пересекаются в одной точке A', являющейся изображением источника.

Линейное увеличение (уменьшение) предмета, даваемое зеркалом (рис.7):

$$R = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}, \quad (2.5)$$

где H – высота изображения, h – высота предмета.

Для сферических зеркал, с практической точки зрения, большое значение имеет получение мнимого изображения, которое мы видим как бы в плоскости зеркала. Увеличенное мнимое изображение предмета получается в вогнутом зеркале, если он помещается между фокусом и полюсом зеркала (рис.8).

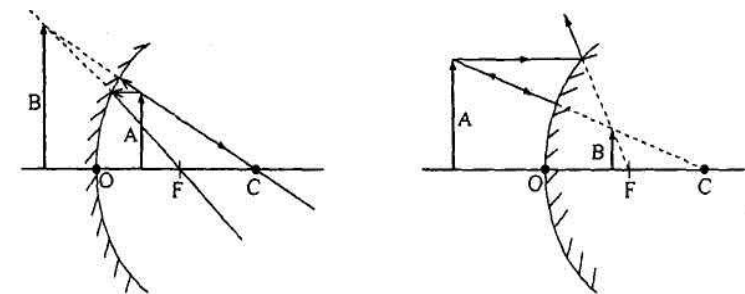


Рис. 8.

Рис. 9

В выпуклом сферическом зеркале получается уменьшенное мнимое изображение при расположении предмета на любом расстоянии от зеркала (рис.9), поэтому такие зеркала применяются для увеличения угла обзора. У выпуклого зеркала фокус мнимый и в формуле зеркала фокусное расстояние берется со знаком «минус».

У выпуклого зеркала фокус мнимый и в формуле зеркала фокусное расстояние берется со знаком «минус».

2.3. Тонкие линзы

Линза является необходимой и самой важной частью большинства оптических приборов. *Линзой* называется прозрачное тело, ограниченное с двух сторон криволинейными поверхностями (в большинстве случаев сферическими). Кривизна поверхностей характеризуется радиусами R_1 и R_2 (одна из поверхностей может быть плоскостью, которую можно рассматривать как сферическую поверхность с бесконечным радиусом кривизны). Если радиус кривизны много больше толщины линзы, то такая линза считается *тонкой*. Именно такие линзы в основном используются на практике, и поэтому все последующие понятия относятся к тонким линзам. Теорию толстых линз мы рассматривать не будем.

Ограничивающая линзу поверхность может быть вогнутой, выпуклой или плоской, и поэтому число видов линз равно шести (рис.10). Если, проходя через линзу, лучи света, идущие от какой-либо точки предмета, собираются в точку, то такая линза называется *собирающей*. При показателе преломления материала линзы больше, чем показатель преломления среды, окружающей линзу, собирающими линзами являются:

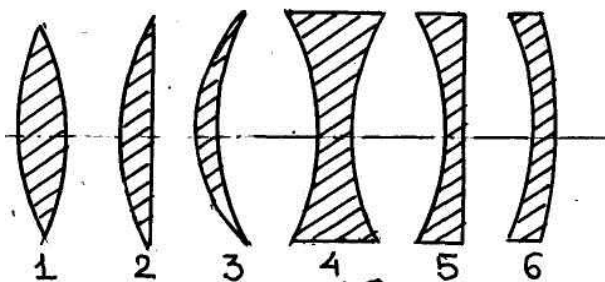


Рис. 10

собирающими линзами являются: двояковыпуклая (рис.10,1), плосковыпуклая (рис.10,2) и вогнуто-выпуклая (рис.10,3). Рассеивающими при тех же условиях являются линзы: двояковогнутая (рис.10,4), плосковогнутая (рис.10,5) и выпукло-вогнутая (рис.10,6).

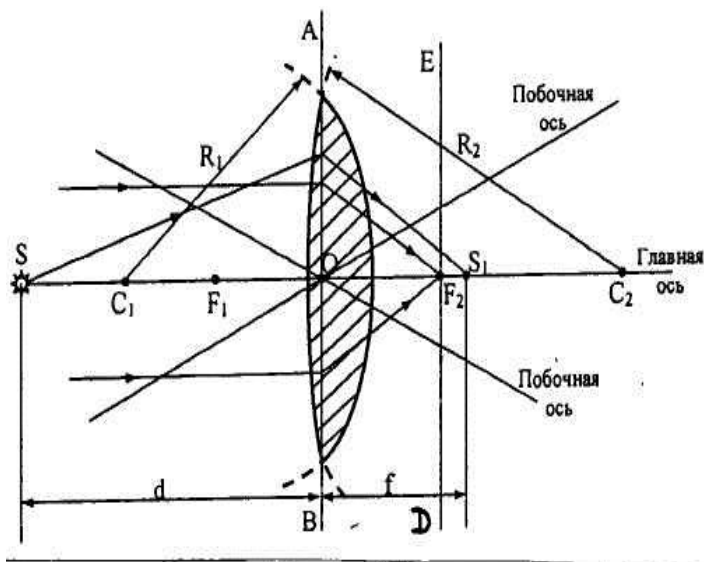


Рис 11

Рассмотрим свойства тонких линз на примере двояковыпуклой линзы с радиусами кривизны поверхностей R_1 и R_2 с центрами в точках C_1 и C_2 (рис.11). Прямая, проведенная через центры сферических поверхностей линзы C_1 и C_2 , называется **главной оптической осью** линзы. Точку линзы, через которую лучи проходят, не изменяя своего направления, называют **оптическим** центром линзы (точка O). Прямые, проходящие через оптический центр линзы и не совпадающие с ее главной оптической осью, называются **побочными оптическими осями** (рис.11).

При построении хода лучей в тонких линзах преломление на обеих поверхностях заменяют одним преломлением в так называемой **главной плоскости** линзы, проходящей через ее оптический центр перпендикулярно главной оптической оси (АОВ). Все расстояния отсчитываются от главной плоскости линзы. Лучи, параллельные главной оптической оси, пересекаются в точке, лежащей на этой оси, и он называется фокусом линзы. У всякой линзы имеются два фокуса F_1 и F_2 , лежащие по обе стороны от нее на равном расстоянии от главной плоскости. Плоскость, проходящая через фокус перпендикулярно главной оптической оси, называется **фокальной плоскостью** (EF_2D). Расстояние от оптического центра линзы O до ее фокуса называется **фокусным** расстоянием F . Величина D , обратная фокусному расстоянию F , называется **оптической силой линзы** и определяется по формуле:

$$D = \frac{1}{F} \left(\frac{n_l}{n_{cp}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (2.6)$$

где n_l – показатель преломления материала линзы, n_{cp} – показатель преломления окружающей линзу среды, R_1 и R_2 – радиусы кривизны сферических поверхностей, ограничивающих линзу. Радиусы кривизны выпуклых поверхностей считаются положительными, вогнутых – отрицательными. У плоских поверхностей радиус кривизны равен бесконечности. Единицей оптической силы линзы является диоптрий (дптр) $D = \text{дптр} = 1/\text{м}$.

При построении изображений в собирающей линзе пользуются следующими правилами хода лучей: 1) луч, параллельный главной оптической оси, после преломления в линзе проходит через фокус; 2) луч, прошедший через фокус, после преломления в линзе идет параллельно главной оптической оси; 3) луч, прошедший через центр линзы, не меняет своего направления; 4) луч, прошедший через передний двойной фокус, после преломления пройдет через задний двойной фокус (двойной фокус – точка на главной оптической оси, удаленная от линзы на двойное фокусное расстояние) (рис.12). Используя правила

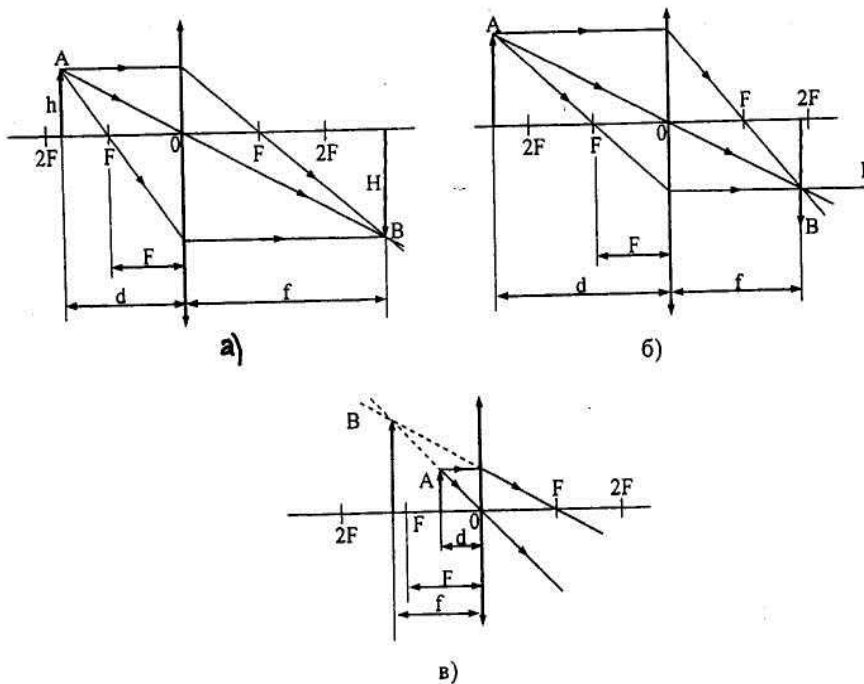


Рис. 12

хода лучей для собирающей линзы, получим три возможных варианта построения изображения предмета А: 1) если предмет находится между $2F$ и F ($2F > d > F$), то расстояние до изображения $f > 2F$ и изображение будет увеличенное, перевернутое и действительное (рис.12, а); 2) если предмет находится за двойным фокусом ($d > 2F$), то изображение будет уменьшенное, перевернутое и дей-

ствительное (рис.12, б); 3) если предмет находится между фокусом и оптическим центром ($d < F$), то изображение будет увеличенное, прямое и мнимое (рис.12, в). Так работает оптическая система, которая носит название лупа.

Тонкая линза дает неискаженное изображение предмета, если свет монохроматический, а предмет мал или так удален от линзы, что лучи от него идут вблизи главной оптической оси линзы (являются параксиальными). В этом случае справедлива формула собирающей линзы:

$$D = \frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}, \quad (2.7)$$

где F – фокусное расстояние линзы, d – расстояние от предмета до линзы, D – оптическая сила линзы, f – расстояние от изображения до линзы (рис.12).

Линейное увеличение, даваемое линзой,

$$k = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}, \quad (2.8)$$

где H – высота изображения, h – высота предмета (рис.12, а).

В рассеивающей линзе лучи, упавшие на линзу параллельным пучком, расходятся так, что их продолжения пересекаются в точке, называемой мнимым фокусом. Правила хода лучей в рассеивающей линзе: 1) лучи, падающие на линзу параллельно главной оптической оси, после преломления пойдут так, что их продолжения пройдут через мнимый фокус; 2) луч, идущий через оптический центр, не меняет своего направления (рис.13).

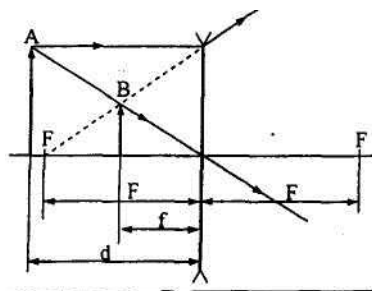


Рис. 13

При построении изображения предмета в рассеивающей линзе всегда получается изображение уменьшенное, прямое и мнимое. Формула рассеивающей линзы имеет вид:

$$-D = -\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}. \quad (2.9)$$

Свойства линз, которые мы рассматривали до сих пор, базировались на том, что показатель преломления материала линз был больше показателя преломления окружающей линзу среды. Тогда оптическая сила, которая является одной из основных характеристик линзы, определяемая по формуле (2.6), для собирающей линзы будет больше нуля ($D > 0$), так как радиусы кривизны R_1 и R_2 положительные (двояковыпуклые линзы), и для рассеивающей – меньше нуля ($D < 0$), так как радиусы R_1 и R_2 отрицательные (двояковогнутая линза).

Для двояковыпуклой линзы $\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) > 0$, но если показатель преломления среды n_{cp} будет больше показателя преломления линзы n_l , то $D < 0$ и двояковыпуклая линза станет рассеивающей. Так будет, например, если двояковыпуклую воздушную линзу поместить в воду. Двояковогнутая воздушная линза, помещенная в воду, будет собирающей, а ее оптическая сила – положительной величиной ($D > 0$). Таким образом, вид линзы определяет не ее форма, а оптическая сила D . Если оптическая сила имеет положительное значение, то линза собирающая, если отрицательное – то рассеивающая.

Погрешности оптических систем называют аберрациями. Они возникают при использовании широких пучков, а также при получении изображений предметов, значительно удаленных от главной оптической оси. Если аберрации нет, то каждой точке изображения однозначно соответствует точка предмета. Это достигается только в том случае, когда изображение образуется узкими световыми пучками, падающими на оптическую систему под малыми углами к ее главной оптической оси. Для того, чтобы убрать аберрации, создают оптические системы, состоящие из нескольких выпуклых и вогнутых линз с различными сортами стекла. Оптическая сила такой системы определяется по формуле:

$$D = D_1 + D_2 + D_3 + \dots, \quad (2.10)$$

где D – оптическая сила системы, D_1, D_2, D_3 – оптические силы линз, входящих в систему.

2.4. Глаз человека

Одним из самых совершенных оптических приборов, которым природа снабдила человека и животных, является глаз. Человеческий глаз представляет

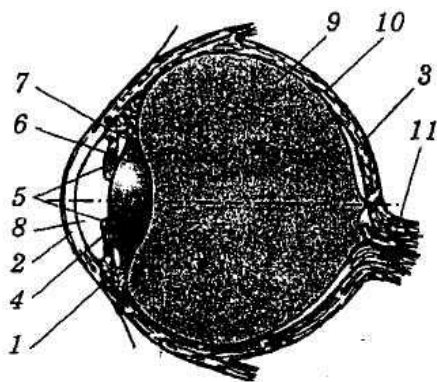


рис. 14

собой замкнутый объем почти шаровидной формы, в который свет попадает через линзу (рис.14). Диаметр глаза около 2,5 см. Снаружи глаз покрыт защитной оболочкой 1 белого цвета – *склерой* (белковая оболочка глаза). Передняя прозрачная часть 2 склеры, сквозь которую в глаз проникает свет, называется *роговой оболочкой* или *роговицей*. С внутренней стороны к склере прилегает *сосудистая оболочка* 3, состоящая из сложного сплетения кровеносных сосудов, питающих глаз. В передней части глаза эта оболочка переходит в

радужную оболочку 4, окрашенную у разных людей в разный цвет. В радужной оболочке имеется отверстие 5 – **зрачок**, который автоматически регулирует количество падающего в глаз света. Зрачок кажется черным потому, что изнутри отражается очень мало света. Диаметр зрачка меняется приблизительно от 2 до 8 мм. За зрачком помещается хрусталик 6 – прозрачное, эластичное, линзообразное тело. Особая цилиарная мышца 7 может менять радиус кривизны поверхности хрусталика, его оптическую силу и фокусное расстояние.

Между роговицей и радужной оболочкой находится **передняя камера 8**, заполненная водянистой жидкостью. Остальную часть глаза до задней стенки (глазного дна) заполняет прозрачная студенистая жидкость – стекловидное тело 9. Глазное дно покрыто очень сложной **сетчатой оболочкой 10** (сетчаткой), представляющей собой разветвления зрительного нерва 11 с нервными окончаниями в виде **палочек и колбочек**. Место, откуда выходит зрительный нерв, носит название – **слепое пятно**. В центре сетчатки имеется небольшая (диаметром около 0,25 мм) область, которая называется **желтым пятном**. Желтое пятно состоит из упакованных очень плотно колбочек, и в нем достигается особая острота зрения и наиболее тонко различаются цвета.

Хрусталик обеспечивает тонкую фокусировку глаза на различные расстояния. Эта фокусировка достигается сокращением цилиарных мышц, в результате которого происходит изменение кривизны хрусталика и, следовательно, его фокусного расстояния. Подобная настройка зрения называется **аккомодацией** глаза. Способность глаза к аккомодации обеспечивает возможность получения на сетчатке резких изображений предметов, находящихся на разных расстояниях. Здоровый глаз в спокойном состоянии дает на сетчатке отчетливое изображение очень удаленных предметов (звезд). Наименьшее расстояние, на котором такой глаз может отчетливо видеть предметы, меняется с возрастом от 10 см (до 20 лет) до 22 см (около 40 лет) или до 30 см (в пожилом возрасте).

Минимальное расстояние, на котором глаз аккомодируется без утомления, для здорового глаза составляет 25 см. Это расстояние называется расстоянием наилучшего зрения. Задний фокус такого глаза в спокойном состоянии находится на сетчатке. Стереоскопический эффект (объемность зрения) объясняется тем, что изображение одного и того же предмета на сетчатке двух глаз несколько отличаются. Это позволяет видеть предмет объемно и оценивать расстояние до него.

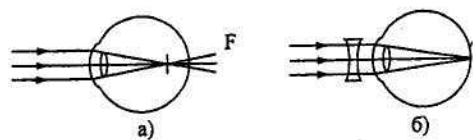


Рис. 15

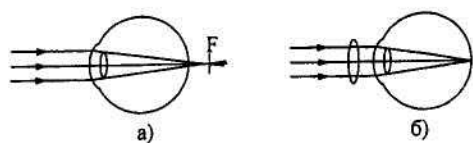


Рис 16

Два наиболее распространенных дефекта зрения – это близорукость и дальнозоркость. Если фокус глаза в спокойном состоянии лежит внутри глаза перед сетчаткой, то глаз называют близоруким (рис.15,а). Такой глаз плохо видит отдаленные предметы. Близорукость глаза исправляют с помощью рассеивающих линз (рис.15, б). Если фокус глаза находится за сетчаткой, то такой глаз называется дальнозорким (рис.16, а). Он плохо видит близкие предметы. Ему приходится делать усилия даже для того,

чтобы видеть очень удаленные объекты. Для исправления дальности зрения пользуются собирающими линзами (рис.16,б).

Глаз осуществляет цветное зрение. Согласно теории цветного зрения, в глазу имеется три типа светочувствительных приемников. На первый тип действует только красный цвет, на второй – зеленый, на третий – сине-голубой. Сложение этих трех спектрально чистых излучений в различных комбинациях с учетом их интенсивности физиологически оказывается эквивалентным получению любого цветового ощущения.

III. Вопросы и задачи

1. **Окна домов днем.** Если смотреть на окна домов в светлое время суток, то можно заметить, что они кажутся темными, то есть темнее наружных стен, даже если стены выкрашены темной краской. Почему окна в доме темнее стен?

2. **Цвет после смачивания водой.** Цвет поверхности тел, способных пропитываться водой, становится более темным и сочным после смачивания. Почему?

3. **Проволочная маска фехтовальщика.** Участники соревнований по фехтованию для защиты лица от уколов всегда проводят бои в проволочной маске. Почему лицо фехтовальщика в маске не видно зрителям, а спортсмен видит все так же хорошо, как и без маски?

4. **Рыбу хорошо видно с моста.** За поведением рыб в водоеме хорошо наблюдать или с моста, или с высокого берега. Хуже наблюдение вести с низкого берега. Почему с моста лучше видно рыбу, плавающую в воде, чем с низкого берега?

5. **Звезды на небе днем и ночью.** Невооруженным глазом мы можем наблюдать звезды только ночью в ясную погоду. Днем на небе звезд не видно. Почему?

6. **Наблюдение темной части луны.** Сразу после захода солнца, когда на горизонте узким серпом поднимается молодая луна, можно увидеть и темную часть лунного диска. Почему это возможно?

7. **Фонари вдоль улицы.** Почему при взгляде на ряд фонарей, расположенных вдоль длинной улицы, кажется, что все они одинаково яркие, хотя расстояния от глаза до фонарей неодинаковы?

8. **Матовый светильник.** Почему лампочки накаливания обычно окружают матовыми плафонами?

9. **Чертеж через матовое стекло.** Матированное стекло, одна поверхность которого гладкая, другая – шероховатая, прикладывают к чертежу: один раз гладкой поверхностью кверху, другой раз – книзу. В одном случае чертеж виден хорошо, в другом – разобрать его невозможно. Почему?

10. **Рассеянное освещение цехов.** Исследование освещенности рабочих мест от различных источников света в металлообрабатывающих цехах показало, что при рассеянном освещении рабочим трудно работать. С чем это связано?

11. **Блеск воздушных пузырьков в воде.** Воздушные пузырьки в прозрачной воде блестят. Почему?

12. **«Одностороннее» зеркало.** Во многих детективных фильмах часто используются «односторонние» зеркала. Действительно ли сквозь них можно видеть в одном направлении, а в другом они отражают свет как обычные зеркала? Попробуйте предложить вариант такого стекла или зеркального покрытия, которое пропускало бы изображение только в одну сторону. Если это невозможно, то как же все-таки действует «одностороннее» зеркало?

Правда, «односторонние» зеркала имеются в любой квартире. В яркий солнечный день через закрытое окно из комнаты хорошо видна улица. Увидеть же с улицы, что происходит в комнате, трудно; прохожий увидит лишь свое отражение в окне. И наоборот, вечером, когда на улице темно, а в комнате светло, с улицы легко увидеть внутренность комнаты, но рассмотреть улицу из комнаты можно только приблизив лицо вплотную к стеклу. Что происходит в этом случае?

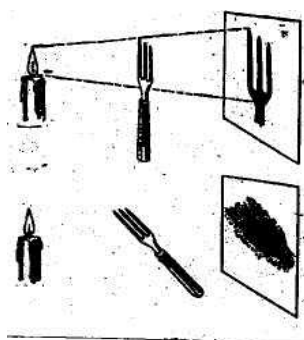


Рис. 17.

13. **Четкость тени.** Известно, что четкость тени, которую отбрасывает на экран непрозрачное тело, зависит только от взаимного расположения источника света, предмета и экрана. Однако если вилка освещается свечой и дает тень на стене (рис.17), то при вертикальном положении вилки тень воспроизводит отчетливо форму ее зубцов, а при горизонтальном положении вилки тень размыта и зубцы видны плохо. Почему?

14. **Луч прожектора.** Луч прожектора хорошо виден в тумане, а в ясную погоду – несколько хуже. Почему?

15. **Два изображения в зеркале.** Если приблизить небольшой темный предмет почти вплотную к плоскому зеркалу, то в нем будут видны два изображения предмета. Правда, второе изображение будет менее четкое. Отчего это происходит?

16. **Отражение света от шара.** На полированный металлический шар слева падает параллельный однородный пучок света. Шар полностью отражает все падающие на него лучи (коэффициент отражения равен единице). Естественно предположить, что максимальный отраженный от шара световой поток будет направлен влево, направо лучи вообще не отражаются. В действительности все происходит совершенно по-другому: шар влево и вправо отражает совершенно одинаково. Как объяснить это явление?

17. **Винт самолета.** В спортивном одномоторном самолете лопасти винта, обращенные к кабине летчика, окрашивают в черный цвет. Зачем?

18. **Непрозрачная бумага становится прозрачной.** Если два тела до известной степени не пропускают какое-либо вещество, звук или тепло, то, введя одно тело между частями другого, получим новое тело с еще более задерживающей способностью. Например, если в полупроницаемой для воды перегородке заполнить поры твердым веществом, то она может стать непроницаемой. Если

промежуток между двумя плохо проводящими звук или теплоту стенками заполнить проводником худшим, чем воздух, то получим еще худший проводник.

Для светового излучения можно указать явление, которое не подчиняется этому правилу. Бумага и стеарин – тела почти непрозрачные. Но если капнуть разогретым стеарином на бумагу, то, как известно, получится прозрачное пятно. Таким образом, непрозрачный стеарин, заполнив поры непрозрачной бумаги, сделал ее прозрачной. Как это объяснить?

19. **Камера-обскура.** Камера-обскура в буквальном переводе с латинского – темная комната, простейшее оптическое приспособление, позволяющее получить на экране изображение предметов. Камера-обскура представляет собой светонепроницаемую коробку (камеру) с небольшим отверстием в одной из стенок, перед которым помещают рассматриваемый предмет; на противоположной стенке коробки (экране) получается изображение этого предмета. Действие камеры-обскуры было известно арабским ученым конца X века, которые наблюдали с ее помощью за солнечными затмениями. Гениальный итальянский ученый и художник эпохи Возрождения Леонардо да Винчи (1452-1519) использовал ее для получения перспективных рисунков.

Камера-обскура послужила прототипом фотоаппарата. Простейший фотоаппарат, который без труда может сделать каждый, имеет вместо объектива булавочное отверстие. Более того, у этого отверстия есть даже ряд явных преимуществ перед линзами: оно не приводит к линейным искажениям и обеспечивает невероятную глубину резкости. Каким образом получается изображение предмета в камере-обскуре и какой у него вид? Создает ли оно вообще какие-либо заметные искажения? В частности, имеются ли у камеры-обскуры хроматические aberrации (цветовые искажения)? Каков оптимальный диаметр отверстия? Что будет, если он окажется больше или меньше оптимального?

20. **Изображение на стене темной комнаты.** В совершенно темную комнату через небольшое отверстие попадает свет. Лучи света, исходящие из различных точек предмета, который находится на улице, проходят через отверстие и создают на противоположной стене комнаты перевернутое изображение предмета. Объясните это явление.

21. **Круглый световой «зайчик».** В шторах, затемняющих комнату, образовалось маленькое отверстие. В отверстие заглянуло солнце, и по стене пополз круглый «зайчик», причем его форма не зависит от формы отверстия (круглое, треугольное, квадратное или вообще произвольное). Почему форма «зайчика» не зависит от формы отверстия? В каком случае появится зависимость от формы отверстия?

Какую форму будет иметь световой «зайчик», если вместо отверстия будет использоваться маленький осколок зеркала?

22. **Мелкие предметы при наблюдении через небольшое отверстие.** Если на листочке темной бумаги проколоть маленькое отверстие и через это отверстие рассматривать мелкие предметы, то можно увидеть эти предметы с увеличением в несколько раз. Объясните это явление.

23. **Длина тени от проводов.** Тени столбов электропередачи утром и вечером становятся длиннее. Меняется ли в течение дня длина тени от проводов?

24. **Размер зеркала.** Какого наименьшего размера должно быть плоское зеркало, висящее вертикально на стене, чтобы, став перед ним, человек мог увидеть себя во весь рост? Как будет зависеть размер зеркала от расстояния между зеркалом и человеком?

25. **Девушка, забывшая геометрическую оптику.** Забывшая геометрическую оптику девушка (а может быть и не знавшая) рассматривает свое лицо в маленькое зеркальце. Чтобы разглядеть одновременно как можно большую часть лица, она то подносит зеркальце к самому лицу, то удаляет его. Объясните девушке, как меняется размер видимой части лица в зависимости от расстояния до зеркальца.

26. **Правое или левое?** На стол поставлено вертикальное плоское зеркало. Перед зеркалом сидит человек, который закрывает правый глаз. После этого он наклеивает на зеркало небольшую бумажку так, чтобы закрытый глаз не был виден. Затем, не сдвигая бумажки и не меняя положения головы, закрывает левый глаз, а правый открывает. При этом он опять не увидит закрытый правый глаз. Почему так происходит?

27. **Отражатели на велосипеде.** Под каким бы углом ни падал свет на велосипедный отражатель (катафот), он практически всегда отражается в направлении источника. Такие отражатели стоят на некоторых автомобилях. Изготовленный во Франции катафот был установлен на советском самоходном аппарате «Луноход-1» и использовался для лазерной локации Луны. Каким образом катафот отражает свет в направлении падения? Ведь обычное зеркало отражает хорошо, но от него отраженный свет направляется обратно к источнику только в том случае, если падающие лучи перпендикулярны к поверхности зеркала. Если на отражатель падает узкий пучок света, то насколько широким будет отраженный пучок?

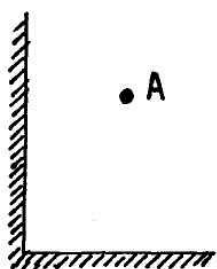


Рис. 18.

28. **Изображения во взаимно перпендикулярных зеркалах.** Два плоских зеркала расположены взаимно перпендикулярно друг к другу (рис.18). Сколько изображений точки А можно получить в этой системе зеркал?

29. **Отражение в двух зеркалах.** Сколько своих отражений вы увидите, если встанете перед двумя стоящими под углом плоскими зеркалами, какие встречаются иногда в магазине одежды? Если угол между зеркалами, например, 90° (см. «Изображения во взаимно перпендикулярных зеркалах»), то одно из изображений оказывается перевернутым по сравнению с обычным изображением в плоском зеркале. Поэтому, когда вы, скажем, поднимаете правую руку, ваше изображение также поднимает правую руку, а не левую, как в обычном зеркале. На свойстве поставленных под углом друг к другу зеркал «размножать» изображения основана широко распространенная игрушка – калейдоскоп.

Как число изображений зависит от угла между зеркалами? Имеет ли значение, где вы стоите? Если да, то где нужно встать, чтобы увидеть максимальное число отражений?

30. **Какой угол между зеркалами?** Точечный источник света и два его изображения, даваемые двумя плоскими зеркалами, лежат в вершинах равнос-тороннего треугольника. Определить расположение зер-кал относительно источника и угол между ними.

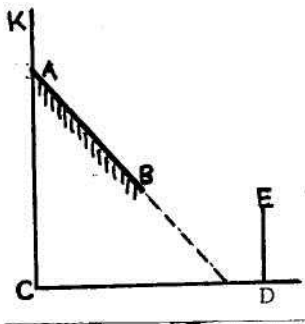


Рис 19

31. **Изображение в плоском зеркале.** Плоское зер-кало АВ расположено под углом к вертикальной стенке КС. На полу CD стоит вертикально стержень DE (рис.19). По-строить изображение стержня в плоском зеркале АВ в слу-чае, показанном на рис.19.

32. **«Лунная дорожка».** В ясную лунную ночь на по-верхности водоема при небольшом ветерке наблюдается «лунная дорожка». Почему возникает «лунная дорожка» и при каких условиях?

33. **Изображение в елочном шаре.** Одно из самых приятных занятий при встрече Нового года – это украшение игрушками елки. Среди елочных игрушек одно из главных мест занимают различные стеклянные шары. Если шар имеет зеркальную поверхность, то в этом шаре можно увидеть свое изображение в уменьшенном и прямом виде в некоторых случаях почти в полный рост. Как оно возникает?

34. **Изображение в глазу собеседника.** В глазу собеседника при некото-рых условиях можно увидеть свое изображение в прямом и уменьшенном виде. Как возникает это изображение?

35. **Выпуклые зеркала в автомобиле.** Выпуклые зеркала сильно искажа-ют форму предметов. Почему же боковые зеркала, которые находятся рядом с кабинами водителей транспорта, устанавливаются именно такие?

36. **«Отражательный конус».** При конструировании различных оптиче-ских приборов (оптических систем) приходится решать задачи максимально

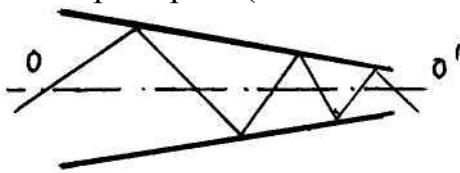


Рис. 20.

возможной концентрации световой и тепловой энергии. Примером такой системы может слу-жить «отражательный конус» (рис.20), ось сим-метрии которого и является осью системы. Пу-чок лучей, падающий на основание конуса O, внутренняя поверхность которого является иде-ально отражающей, после многократных отражений рано или поздно должен

выйти через отверстие O', что и решает поставленную задачу. А так ли все это на самом деле?

37. **Поток параллельных лучей.** Можно ли получить излучение, пред-ставляющее собой широкий поток строго параллельных световых лучей, с по-мощью зеркала? Какая форма должна быть у такого зеркала?

38. **Показатель преломления вещества.** Скорость света в вакууме изме-рена с достаточно большой точностью и равна $c_0=(29973000\pm 300)$ м/с. На прак-тике применяется значение $c_0=3\cdot 10^8$ м/с. Скорость света в прозрачных веще-ствах, как правило, не измеряется, а определяется, во сколько раз скорость све-та в вакууме больше, чем данной среде. Отношение скорости света в вакууме к скорости в данной среде называется абсолютным показателем преломления. В реальных условиях показатель преломления измеряется по отношению к возду-

ху, так как скорость света в вакууме и воздухе мало отличаются друг от друга (показатель преломления воздуха равен 1,000292). Величина показателя преломления для твердых тел измеряется в интервале от 1,3 (лед) до 2,42 (алмаз), для жидкостей – от 1,2 (жидкий кислород) до 1,6 (расплавленный нафталин), для газов (при нормальных условиях) – от 1,000035 (гелий) до 1,000702 (ксенон).

Измерение показателя преломления чаще всего производится в свете желтой линии натрия ($\lambda=593,3$ нм). Почему для точного определения показателя преломления вещества пользуются не белым светом, а монохроматическим желтым светом?

39. **Очки для плавания под водой.** Человек с нормальным зрением, плавающая под водой, видит немного хуже, чем в том случае, когда надевает специальные очки. Почему?

40. **Четырехглазая рыба.** В Центральной Америке водится рыба с четырьмя глазами (Anableps) – самое необыкновенное чудо на земле. У нее уникальные большие глаза и выпуклые, как у жабы; когда она плавает в воде, расположение глаз такое, что верхняя их часть находится над водой, а нижняя – под водой.

Каждый глаз рыбы Anableps разделен на две части. Глазной хрусталик может концентрироваться одновременно на двух объектах – над водой и под водой, отсюда и название этой рыбы, так как два глаза функционируют как четыре.

Обитает четырехглазая рыба исключительно в мутных пресноводных мелких ручьях. Плавают рыбы стаями, питаются насекомыми. Хорошее зрение над водой позволяет им легко определять местоположение добычи и быстро ловить ее. Четырехглазую рыбу очень трудно поймать, так как приближающегося рыбака она видит издалека.

Еще одна особенность этой рыбы: когда она плывет, голову окунает в воду. Это происходит из-за отсутствия глазных каналов, которые увлажняют глаза. Ученые считают, что такой редкий экземпляр образовался в период адаптации глаз к воздушно-водной поверхности.

Для того чтобы видеть под водой, человеку нужны специальные очки (см. «Очки для плавания под водой»). Как же четырехглазая рыба может видеть одновременно в воде и в воздухе?

41. **Человек-невидимка.** У многих народов мира герои сказок становятся невидимыми чаще всего с помощью шапки-невидимки. Такое волшебное превращение объяснить невозможно какими-либо законами природы. А вот герою знаменитого романа Герберта Уэлса «Человек-невидимка» удалось это сделать. Он сумел изменить коэффициент преломления своего тела так, что стал невидимым. Каким, по вашему мнению, должно быть значение этого коэффициента преломления? Если человек-невидимка, имея такой коэффициент преломления, становится невидимым, то может он видеть что-либо сам?

42. **«Сломанная» чайная ложка.** Если в прозрачный стакан налить чуть больше половины воды и опустить в него чайную ложку, то ложка, полупогруженная в воду, будет иметь изломанный вид (рис. 21). При этом погруженная в

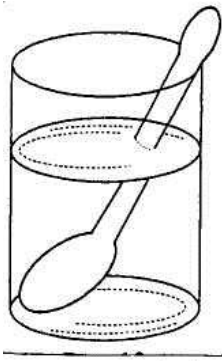


Рис. 21

воду часть ложки будет зрительно приподниматься вместе с дном стакана. Почему так происходит?

43. **Рыбалка острогой.** Острога – вилообразное рыболовное орудие с зубцами, которые бывают металлические, деревянные и даже костяные. Охотятся на крупную рыбу чаще всего с лодки в прозрачных водоемах днем или ночью. Правда, ночью приходится применять подсветку. Для того, чтобы поймать рыбу, необходимо производить удар острогой вертикально. И только наиболее опытные рыбаки могут делать удар под углом к поверхности воды. Почему лучше делать удар острогой вертикально?

44. **Чем дальше, тем мельче.** Если человек приближается к бассейну с водой, то в тот момент, когда он находится на сравнительно большом расстоянии от бассейна, ему кажется, что глубина бассейна небольшая. По мере приближения бассейн становится все глубже и глубже. Но даже когда человек стоит у бортика бассейна, водоем представляется глазу приподнятым почти на третью часть глубины. Если же дно бассейна рассматривать с лодки, находящейся в центре бассейна, то всегда будет казаться, что глубина самая большая будет прямо под лодкой, кругом – все мельче и мельче по мере удаления от лодки. Дно кажется вогнутым. Чем объясняется такое кажущееся изменение глубины водоема?

45. **С карандашом в ванне.** Если, купаясь в ванне, вы захотите немного развлечься, то заранее захватите с собой карандаш (или стержень) и понаблюдайте за его тенью на дне ванны. Погрузив карандаш в воду под некоторым углом, вы увидите, что его тень на дне ванны похожа на два стержня с закругленными концами, которые разделены светлым промежутком (рис.22). Откуда возник этот промежуток и чем определяется его ширина?

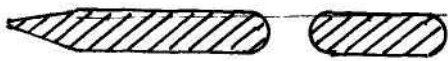


Рис. 22

46. **Искривление лазерного луча.** Если в сосуд с водой, в который брошено несколько кусочков сахара (без перемешивания), падает узкий лазерный луч света почти параллельно дну сосуда, то он искривится вниз, а затем отразится от дна, как показано на рис.23. Почему луч загибается вниз и почему он отражается? Почему отраженный вверх луч снова искривляется?

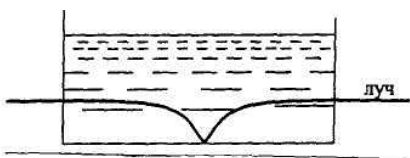


Рис. 23

47. **Мир из-под воды.** Как выглядит окружающий нас мир с точки зрения рыбы?

48. **Красные буквы.** Если смотреть на светящуюся рекламу (например, из газосветных трубок), то красные буквы всегда кажутся выступающими вперед по отношению к синим или зеленым, хотя мы знаем, что буквы разных цветов лежат в одной плоскости. Чем это объяснить?

49. **Глаз человека в воде.** Предположим, что мы можем находиться под водой сколь угодно долго, держа глаза открытыми. Что мы увидим в абсолютно светлой воде? Казалось бы, раз вода прозрачная, ничего не должно мешать ви-

доть под водой так же хорошо, как в воздухе. Однако человек под водой видит плохо. Убедиться в этом может аквалангист, ведь он может находиться под водой довольно долго, все зависит от запаса воздуха в баллонах. Но он надевает при погружении в воду маску с плоским стеклом. Зачем? Тот же вопрос относится и к пловцам на соревнованиях в бассейне или свободной воде. Они также надевают очки с плоским стеклом. Не говоря уже о водолазах, у них шлемы всегда снабжены плоским, а не выпуклым стеклом.

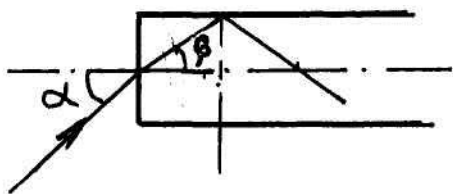


Рис. 24

50. **Свет в стеклянном стержне.** На торец стеклянного стержня падает свет под углом α (рис. 24). Каким должен быть наименьший показатель преломления стекла, чтобы свет, вошедший в стержень, не мог выйти через его боковую стенку независимо от угла α ?

51. **Миражи в пустыне.** Когда мы говорим о чем-то неуловимом, нереальном, пригрезившемся, мы используем слово мираж. Подобно сказке, он восхищает нас, влечет к себе и бесследно исчезает, когда мы пробуем к нему приблизиться. Для уставшего путника в пустыне он может представляться долгожданным оазисом. Но бесполезно надеяться отдохнуть и освежиться в таком оазисе – это всего лишь мираж.

В раскаленной пустыне, где вокруг горячий песок, вдруг впереди, у линии горизонта, возникает озеро, которое кажется совершенно реальным. Взгляду утомленного путника являются иногда образы пальм даже в тех местах, где дерево заведомо не может быть. Изнуренному жаждой человеку, по-видимому, достаточно просто увидеть пальмы или озеро, чтобы убедить себя в том, что там его ждет вода. Кажется, что надо преодолеть всего лишь один-два километра, и можно освежиться. Но идем вперед, а озеро все там же где-то впереди. Такой мираж называют нижним («озерным» или «оазисным»).

Озерные миражи наблюдаются не только в знойной пустыне. Многие из нас наблюдали такой мираж на убегающей вдаль асфальтовой или бетонной дороге, сильно раскаленной летним солнцем. По мере того, как вы двигаетесь по дороге, «лужи» воды отступают все дальше и дальше, оставаясь недостижимыми.

Чем вызван «оазисный» мираж в пустыне и над раскаленными улицами и шоссе?

52. **Верхний мираж.** Если воздух у самой поверхности земли или воды не нагрет, а заметно охлажден по сравнению с более высокими воздушными слоями, то может возникнуть так называемый «верхний» мираж, который как бы висит в воздухе на некоторой высоте. Нижние миражи (см. «Мираж в пустыне») наблюдают, как правило, в пустынях и знойных степях, а верхние миражи наблюдают в северных широтах. Верхние миражи часто возникают над морем, когда оно значительно холоднее воздуха. Иногда такие миражи можно видеть над замерзшими поверхностями при внезапной оттепели.

Верхние миражи отличаются разнообразием. В одних случаях они дают прямое изображение объекта, в других случаях возникает перевернутое изоб-

ражение, а иногда может быть двойное, когда наблюдаются два изображения: прямое и перевернутое. Как объяснить это оптическое явление?

53. **Мираж «Фата-моргана».** Существовали легенды о злых духах, специально вызывающих сказочные видения для того, чтобы обмануть путников, заставить их свернуть с дороги. Согласно одной из легенд, коварная фея Моргана любила охотиться за человеческими душами, подстерегая их в пустыне, соблазняя призрачными видениями – сверкающими дворцами, садами и роскошными фонтанами. Путники сбивались с дороги и погибали в песках. «Фата-моргана» - так называют особый вид миражей, когда над песчаной равниной или над поверхностью моря вдруг возникают призрачные сады и луга, дворцы и замки, фонтаны и колоннады и при этом одна картина быстро и неуловимо меняется другой.

Фата-моргана – красивейший из миражей; встречается он редко, но вот в Мессинском проливе, отделяющим Сицилию от Апеннинского полуострова, это обычное явление. Этот мираж объяснить значительно труднее, чем другие, поскольку он обусловлен несколькими конкурирующими эффектами. Попробуйте и вы разгадать его загадку.

54. **Миражи сверхдальнего видения.** Среди различных миражей особенно удивительными являются очень редко встречающиеся миражи сверхдальнего видения. Французский астроном Камиль Фламарион (1842-1925) в своей книге «Атмосфера» описывает пример подобного миража: «Опираясь на свидетельства нескольких лиц, заслуживающих доверия, я могу сообщить про мираж, который видели в городе Вербье (Бельгия) в июле 1815 года. Однажды утром жители города увидели в небе войско, и так ясно, что можно было разглядеть костюмы артиллеристов и даже, например, пушку со сломанным колесом, которое вот-вот отвалится... Это было утро сражения при Ватерлоо!». Описанный мираж был изображен в виде цветной акварели одним из очевидцев. Следует заметить, что расстояние от Вербье до Ватерлоо по прямой более 100 км. Известны случаи, когда подобные миражи наблюдались и на значительно больших расстояниях – до 1000 км. «Летучего голландца» следует отнести именно к таким миражам. Как объяснить такой мираж?

55. **Видимое расположение звезд.** Наблюдая за ночным небом, мы знаем, где находятся те или иные звезды. Изменится ли видимое расположение звезд на небе, если вдруг исчезнет земная атмосфера?

56. **Изображение предмета от затемненной линзы.** На экране получено изображение стрелки с помощью собирающей линзы. Через середину стрелки проходит оптическая ось. Что произойдет с изображением стрелки, даваемым линзой, если половину линзы закрасить черной краской?

57. **Освещенность изображения Солнца, даваемого линзой.** Как изменится освещенность изображения Солнца, даваемого плоско-выпуклой линзой, если линзу разрезать по диаметру и сложить вплотную плоскими сторонами?

58. **Участок тонкостенной сферы.** Из стеклянной тонкостенной сферы радиусом $R=10$ см и толщиной $d=1$ мм вырезан участок в виде сегмента. Показатель преломления стекла $n=1,5$. Получившийся участок сферы является лин-

зой. Какая это линза – собирающая или рассеивающая? Чему равна ее оптическая сила?

59. **Фотография «полосатого» осла.** Желая получить снимок зебры, фотограф снял белого осла, надев на объектив стекло с черными полосками. Что же получилось на снимке?

60. **Увеличенная ложка в стакане с водой.** Если понаблюдать за ложкой или другим предметом через боковую поверхность цилиндрического тонкостенного стакана, то ложка (предмет) в стакане будет казаться увеличенной. Почему?

61. **У какой линзы больше оптическая сила?** Имеются две тонкие линзы: одна собирающая, вторая – рассеивающая. Как определить, какая из них обладает большей оптической силой, не прибегая к помощи специальных приборов?

62. **Две собирающие линзы.** Находясь в комнате, освещенной электрической лампочкой накаливания, необходимо узнать, какая из двух собирающих линз имеет большую оптическую силу, не имея в наличии никаких специальных приборов. Каким образом это сделать?

63. **Кошачьи глаза в темноте.** Почему глаза кошки светятся в темноте, если на них направить луч фонарика? Почему днем блеск кошачьих глаз значительно слабее? Зависит ли количество отраженного света от угла между направлением вашего взгляда и направлением луча света, падающего на глаз кошки? Почему глаза человека не вспыхивают так же ярко, если их осветить ночью?

64. **Коричневые пятна на листьях.** Всем садовникам и огородникам хорошо известно, что в солнечный очень жаркий день деревья и растения не следует поливать, так как капли воды оставляют на листьях коричневые пятна. Почему они возникают?

65. **Как видит человек в воде?** Человек с нормальным зрением (не пользуется очками) хорошо видит, но, погружаясь в воду, даже очень чистую, видит несколько хуже. Почему человек в воде начинает видеть хуже, чем в воздухе?

66. **Близорукий человек.** Чтобы лучше видеть, не применяя очки, близорукие люди щурят глаза. Зачем?

67. **Очки для нормально видящего в воде.** Близоруким или дальнозорким является человек, который нормально видит в воде? Какие очки ему следует носить?

68. **Чтение без очков при ярком освещении.** Почему при ярком освещении те, кто пользуется не очень сильными очками, могут читать и без очков?

69. **Цвет озер и океанов.** Какого цвета чистое прозрачное горное озеро? Зависит ли его цвет от облачности? Как влияет на цвет характер дна и глубина озера? Чем объясняется различие в цвете различных озер? Каков цвет морской воды у берегов и в открытом море? В какие цвета окрашены морские волны?

70. **Светящиеся столбы.** Иногда в тихий зимний вечер или ночью над уличными фонарями можно увидеть светящиеся столбы. Почему возникают такие светящиеся столбы?

71. **Световой поток через линзу.** На стеклянную собирающую линзу падает пучок лучей, параллельных главной оптической оси. Через какую часть линзы – центральную или периферийную – прохождение света будет более полным?

72. **Действительное изображение в рассеивающей линзе.** Параллельный пучок лучей, проходя через двояковогнутую стеклянную линзу, становится расходящимся. Следовательно, получение действительного изображения с помощью такой линзы невозможно. Однако существует условие, при котором двояковогнутая линза, находясь в воздухе, может давать действительное изображение. Что это за условие?

73. **Увеличение лупы.** Казалось бы, лупа должна увеличивать все без исключения. Однако существуют такие объекты, которые лупа не увеличивает. Какие это объекты?

74. **Глаз хорошо видит в воде и в воздухе.** Какую форму должна была бы иметь передняя поверхность роговицы глаза воображаемого животного, которое одинаково хорошо видело бы и в воде, и в воздухе?

75. **Разделение цветов.** Широкий параллельный пучок света распространяется в некоторой жидкости. В состав пучка входят лучи двух спектральных цветов. Как отделить лучи разных цветов один от другого при помощи тонкой полупрозрачной плоскопараллельной пластинки, если показатель преломления у вещества пластинки меньше, чем у жидкости, и значения его для лучей обоих цветов различны?

76. **Изображение мухи.** Фотограф увидел, что во время фотографирования на объектив села муха. Очевидно, на снимке появится изображение мухи. Так ли это?

77. **Линзы из плоскопараллельной пластины.** Плоскопараллельную пластинку разрезали, как показано на рис. 25, то есть получили две линзы: плосковыпуклую и плосковогнутую. После чего получившиеся линзы немного раздвинули.



рис. 25.

Как будет изменяться пучок параллельных лучей после прохождения этой системы, если он падает: а) со стороны выпуклой линзы? б) со стороны вогнутой? Как будет зависеть поведение пучка от расстояния между линзами?

78. **Тонкая линза и зеркало.** Тонкая двояковыпуклая линза положена на плоское зеркало. Где нужно поместить точечный источник света, чтобы изображение, даваемое этой системой, было действительным и совпадало с самим источником?

79. **Вогнутое зеркало с налитым слоем жидкости.** В вогнутое сферическое зеркало радиусом R налита тонким слоем жидкость, показатель преломления которой равен n . Как определить главное фокусное расстояние такой оптической системы?

80. **«Лед зажигает».** Можно ли добыть огонь с помощью льда?

IV. Подсказки

1. Окна и стены домов отражают свет по-разному.
2. Любое тело мы наблюдаем в отраженном свете.
3. За маской лицо фехтовальщика освещено очень слабо, а маска освещена сильно.
4. Лучи от рыбы, идущие под малыми углами, слабо отражаются от границы вода-воздух, и большая часть проходит к наблюдателю.
5. Свет от Солнца и звезд имеет различную яркость.
6. Происходит отражение света от Земли.
7. О яркости источника света человек судит по освещенности изображения на сетчатке глаза.
8. Матовый светильник дает рассеянный свет.
9. Световые лучи, падающие на матовую поверхность, равномерно рассеиваются во всех направлениях.
10. Рассеянный свет не дает блики.
11. Отражение на границе вода-воздух.
12. Комната, в которой происходит наблюдение, должна быть очень светлой, а комната с наблюдателем должна быть темной.
13. При узком источнике света граница света и тени от всех частей источника расположена примерно в одних и тех же местах, для широкого – в разных местах.
14. На мельчайших капельках воды тумана происходит рассеяние света.
15. При отражении света от амальгамы может происходить отражение от границы стекло-воздух.
16. На шаре есть участки, которые отражают падающие лучи света в обратном направлении, и участки, которые отражают лучи света по направлению падения.
17. Черный цвет отражает мало световых лучей.
18. Стеариновое пятно на бумаге делает бумагу более однородной, не рассеивающей световые лучи.
- 19, 20. Для получения изображения в камере-обскуре применяется закон прямолинейного распространения и явление дифракции.
21. Смотри подсказку к вопросу «Изображение на стене темной комнаты».
22. Резкость изображения предмета будет лучше при ограничении рабочей поверхности хрусталика.
23. Тени от вертикальных и горизонтальных предметов ведут себя по-разному.
- 24, 25. Необходимо сделать построение изображения в плоском зеркале, применив закон отражения.
26. Плоское зеркало меняет местами правое и левое, но не переставляет верх и низ.
27. Отражение происходит от поверхности, покрытой объемными телами соответствующей формы.

28. Изображение предмета получается на пересечении двух лучей, идущих от предмета при отражении.
29. Изображение в одном зеркале является предметом для получения изображения в другом и т.д.
30. Точечный источник света и его изображение лежат симметрично относительно плоского зеркала.
31. Построение изображения производится на продолжении зеркала.
32. Необходимо рассмотреть, как будут отражаться лучи света от различных участков волны на поверхности воды.
33. Изображение получается в выпуклом зеркале, роль которого играет шар.
34. Глазное яблоко с точки зрения геометрической оптики – это выпуклое зеркало.
35. В выпуклых зеркалах изображения всех предметов получают в уменьшенном виде.
36. В коническом зеркале внутренняя поверхность не всегда приводит к выходу из отверстия в вершине.
37. Следует рассмотреть ход лучей в зеркале в виде параболоида вращения.
38. Показатель преломления при различных длинах волн имеет различные значения.
39. Для четкого изображения на сетчатке глаз должен преломлять световые лучи.
40. Глаза четырехглазой рыбы разделены на две части с отдельными роговыми оболочками и сетчаткой.
41. Коэффициент преломления тела человека должен быть равен коэффициенту преломления воздуха.
42. Причиной излома чайной ложки является преломление световых лучей на границе раздела двух сред (вода-воздух).
43. При рыбалке с помощью остроги необходимо учитывать преломление лучей при переходе из воды в воздух.
44. Причина кажущегося изменения глубины водоема – преломление световых лучей.
45. Светлый промежуток на тени от карандаша возникает при смачивании и в результате преломления лучей света на смачиваемом участке карандаша.
46. Неразмешанный сахар приводит к тому, что коэффициент преломления жидкости меняется с глубиной.
47. Необходимо рассмотреть явление полного внутреннего отражения и ход лучей на границе раздела двух сред.
48. Показатель преломления зависит от длины волны светового излучения.
49. Плоское стекло отделяет глаз от воды.
50. На боковой поверхности стеклянного стержня должно наблюдаться полное внутреннее отражение.

51. При сильном нагревании воздуха у поверхности земли плотность воздуха относительно мала, с увеличением высоты плотность воздуха возрастает, соответственно, увеличивается показатель преломления воздуха.

52. Если воздух у поверхности земли холодный, а на высоте теплый, то коэффициент преломления воздуха больше внизу и с увеличением высоты монотонно убывает.

53. Зависимость температуры от высоты может быть нелинейной, то есть меняться во времени произвольно.

54. Образуется слой очень холодного воздуха, ограниченного сверху и снизу очень теплым воздухом.

55. Показатель преломления воздуха атмосферы плавно меняется от точки к точке.

56. Изменится освещенность изображения предмета.

57. Освещенность определяется световым потоком, падающим на какую-то площадку.

58. Оптическая сила линзы определяется по формуле $D = \left(\frac{n_l}{n_{cp}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$, где n_l – показатель преломления материала линзы, n_{cp} – показатель преломления среды, R_1 и R_2 – радиусы кривизны поверхностей линзы.

59. Для получения хорошего снимка предмета необходимо наводить фотоаппарат на резкость.

60. Вода в стакане играет роль цилиндрической линзы.

61. Оптическая сила системы линз равна сумме оптических сил линз, входящих в систему.

62. Оптически более сильной является линза с меньшим фокусным расстоянием.

63. Глаза кошки имеют систему линз и зеркала, которые отражают падающий свет в обратном направлении.

64. Капли воды выполняют роль собирающей линзы.

65. На границе раздела вода-хрусталик глаза человека лучи света практически не преломляются.

66. Уменьшается диафрагма зрачка глаза.

67. Хрусталик глаза – собирающая линза. Ход лучей у хрусталика в воде и в воздухе отличаются.

68. При ярком освещении меняется диаметр зрачка.

69. В глубокой чистой воде отражается небо, в мелкой – дно.

70. Светящиеся столбы возникают в результате отражения света от пластинчатых кристаллов льда (снежинок).

71. На центральную часть линзы угол падения света будет близким к нулю.

72. На линзу необходимо направить сходящийся пучок лучей света.

73. Лупа увеличивает размеры, но не увеличивает углы.

74. При падении лучей под углом, равным нулю, преломление не происходит.

75. Так как показатель преломления вещества пластинки меньше, чем у жидкости, на пластинке может наблюдаться полное внутреннее отражение.

76. Каждый участок линзы работает как целая линза.

77. Ход лучей в линзах зависит от их взаимного расположения: больше или меньше фокусного расстояния.

78. При прохождении через линзу в плоском зеркале получается мнимое изображение источника, которое является предметом для лучей, идущих через линзу в обратном направлении.

79. Вогнутое зеркало и жидкость, налитая в него, образуют оптическую систему, состоящую из зеркала и жидкой линзы.

80. Из льда можно сделать линзу.

V. Ответы

1. Окна домов кажутся темнее наружных стен, так как отражение от стен всегда больше, чем отражение от прозрачных, то есть пропускающих свет окон.

2. Цвет какой-либо поверхности определяется спектральным составом лучей, отражаемых ею. Когда поверхность сухая, то на лучи, соответствующие окраске поверхности, накладывается беспорядочно рассеянный белый свет от шероховатостей и неровностей поверхности (например, от ворсинок ткани). Присутствие этого рассеянного белого света делает основной цвет поверхности блеклым и менее ярким.

Когда поверхность пропитана водой, то все эти неровности затягиваются поверхностной пленкой воды и рассеянное белое излучение исчезает. Остается только основной тон окраски поверхности, который воспринимается нами как более сочный и темный, чем до смачивания.

3. Лицо человека в проволочной маске освещено гораздо хуже, чем сама маска и окружающие предметы. Поэтому свет, отраженный лицом, очень слаб по сравнению со светом, идущим от маски и других предметов. Вот почему для наблюдателя из публики лицо фехтовальщика в маске практически неразличимо. Сам же спортсмен, наоборот, хорошо видит ярко освещенные предметы вокруг себя на фоне слабого света, отраженного внутренней стороной проволочной маски. К тому же изображение маски в глазу спортсмена получается сильно размытым (несфокусированным), так как маска расположена сильно близко к глазу.

Кроме того, проволочная сетка находится близко от лица спортсмена и она закрывает для наблюдателя довольно большую часть лица. В то же время спортсмену эта маска не мешает.

4. Когда рыба рассматривается с моста, лучи от нее, идущие в глаз, падают на поверхность воды под малыми углами (отсчет углов производится от перпендикуляра к поверхности-нормали), и поэтому их отражение от поверхности невелико по сравнению с тем случаем, когда рыба рассматривается с невысокого берега. При рассмотрении рыбы с невысокого берега возможен даже случай, когда лучи света от рыбы вообще в глаз не будут попадать (полное внутреннее отражение).

Кроме этих лучей в глаз попадают лучи от Солнца, которые создают общий слепящий фон. Если наблюдатель стоит на мосту, в его глаза попадают солнечные лучи, падающие под меньшим углом, чем в том случае, когда он стоит на берегу. Поэтому эти лучи меньше отражаются от поверхности воды и фон в этом случае менее яркий.

5. Солнечный свет, рассеянный атмосферой Земли, значительно ярче света, идущего от звезд. Поэтому днем звезды не видны.

6. Освещенность «темной» части Луны (закрытой от Солнца Землей) обусловлена светом, отраженным от земной атмосферы и поверхности Земли.

7. Видимая яркость фонаря равна освещенности изображения на сетчатке глаза, то есть отношению светового потока, падающего в глаз, к площади изображения на сетчатке. При увеличении расстояния до источника света уменьшается световой поток, падающий в глаз, но одновременно также уменьшается и площадь изображения на сетчатке. Отношение этих двух величин остается постоянным, если можно пренебречь потерей световой энергии вследствие поглощения и рассеяния при распространении в воздухе.

В тумане видимая яркость изображения падает по мере удаления от источника света, поскольку становится заметным поглощение и рассеяние энергии.

8. Матовый колпак равномерно рассеивает свет от лампочки накаливания во всех направлениях. Поэтому, хотя яркость нити накаливания лампочки очень большая, яркость матового колпака (то есть световой поток, получаемый с единицы поверхности колпака) мала. Сравнительно невелика и яркость изображения колпака на сетчатке глаза.

9. Шероховатая поверхность стекла рассеивает падающий на нее свет равномерно во все стороны. Если стекло лежит на чертеже гладкой поверхностью (рис.26, а), то в каждую точку шероховатой поверхности стекла попадают лучи, идущие как от линий чертежа, так и от чистых мест. Световые потоки, идущие от разных участков чертежа, рассеиваются на шероховатой поверхности во все стороны одинаково, и от каждого участка в глаз попадают лучи, идущие как от линий чертежа, так и от чистых

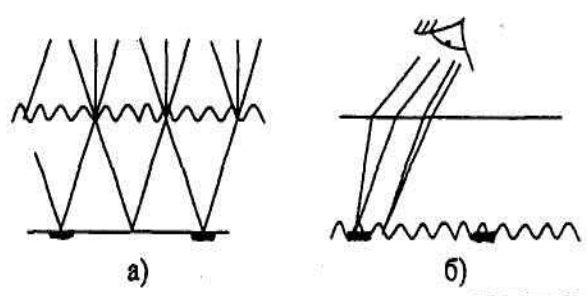


Рис. 26.

мест. Разные участки стекла поэтому кажутся одинаково яркими и разобрать чертеж невозможно.

Если же стекло обращено к чертежу матовой поверхностью (рис.26, б), то матовая поверхность оказывается освещенной неравномерно. Лучи, идущие из разных точек этой поверхности, попадают в глаз, не пересекаясь, и чертеж легко разобрать.

10. О форме блестящих предметов мы судим обычно по бликам на их поверхности. При рассеянном же освещении блики отсутствуют и в металлообрабатывающих цехах труднее ориентироваться при обработке деталей.

11. Если свет падает на поверхность воды, то воздушные пузырьки блестят в воде в результате отражения света на границе раздела вода-воздух.

12. Действие большинства «односторонних» зеркал обусловлено тем, что одна их сторона (скажем, комната, в которой находится допрашиваемый преступник) освещена намного ярче, чем другая (в которой находится человек, наблюдающий за преступником). Часть света, падающего на стекло из ярко освещенной комнаты, отражается передней и задней поверхностями стекла. Если с другой стороны стекла достаточно темно, то преступник видит только отраженный свет, и стекло кажется зеркальным, а точнее, слабое изображение наблюдающего теряется на фоне мощного светового потока, отраженного стеклом. К наблюдателю же сквозь стекло проходит достаточное количество света, и он отчетливо видит преступника. Зеркальный эффект еще более усиливается, если стекло покрыто тонким слоем металла. Благодаря этому увеличивается количество света, отраженного к преступнику, но вместе с тем количество проходящего света оказывается достаточным для наблюдения. То же самое происходит в яркий солнечный день: из комнаты хорошо видно, что происходит на улице, но ничего не видно с улицы, что происходит внутри комнаты, и, наоборот, ночью хорошо видно с улицы, что происходит внутри комнаты, и плохо видно из комнаты улицу.

13. Причина в том, что источник света (пламя свечи) вытянут в вертикальном направлении.

Когда вилка расположена вертикально, то для каждого из зубцов граница света и тени на экране от всех частей источника расположена примерно в одних и тех же местах, и поэтому получается отчетливая тень зубцов. Когда же вилка расположена горизонтально, то граница света и тени от одной части источника для данного зубца будет сдвинута на экране относительно границы света и тени, создаваемой другой частью источника от того же зубца, а поэтому вся тень вилки будет размыта.

14. Туман состоит из мельчайших капелек воды, на которых происходит рассеяние света. Поэтому луч прожектора хорошо виден в тумане и несколько хуже в воздухе в ясную погоду.

15. Дополнительное второе изображение предмета в плоском зеркале появляется потому, что часть световых лучей, отраженных слоем амальгамы в глубине зеркала, отражается от границы стекло-воздух и вновь попадает на амальгаму.

16. Хорошо отполированный металлический шар падающий на него световой поток отражает одинаково и в одну, и в противоположную стороны. Для того, чтобы доказать, что это действительно так, рассмотрим ход лучей, падающих на шар. На рис. 27 мы видим, что луч АВ после отражения пошел влево, а луч DE – вправо по направлению EF.

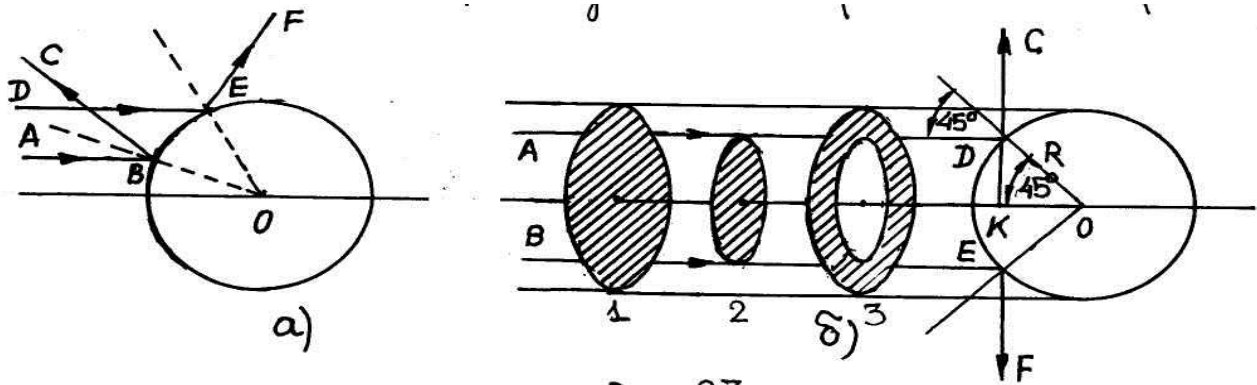


Рис. 27

Найдем точку D (рис.27, б), от которой падающий слева луч AD отразится вертикально вверх, и точку E, от которой луч BE отразится вертикально вниз.

Угол ADC равен 90° . Следовательно, точку D можно найти как точку, в которой перпендикуляр к поверхности шара составляет угол 45° с направлением падения луча и OD радиус шара R. Аналогично находим точку E, от которой луч отражается вертикально вниз. Легко заметить, что плоскость CDEF, проходящая через точки D и E перпендикулярно к направлению падения лучей, делит шар на две части: одна (центральная) отражает лучи влево (в сторону падения лучей), вторая – вправо (по направлению падения лучей). Найдем, сколько лучей попадает при отражении в правую и левую стороны шара. Всего на шар падает столько лучей, сколько их проходит через круг 1, радиус которого равен радиусу шара R. Разделим этот круг на две части: малый круг 2 с радиусом, равным $r = R \sin 45^\circ = R/\sqrt{2}$, и кольцо 3. Тогда из всех падающих на шар лучей в левую сторону отразится количество, пропорциональное площади круга 2, в правую – пропорциональное площади кольца 3. Площадь круга 1 равна $S_1 = \pi R^2$, а площадь круга 2 - $S_2 = \pi r^2 = \pi \left(\frac{R}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{S_1}{2}$, то есть площадь круга 2 составляет половину площади круга 1. Значит, на кольцо 3 остается вторая половина площади круга 1. Таким образом, на часть шара, отражающую лучи влево, падает столько же света, сколько и на ту часть шара, отражающую вправо. Следовательно, шар вправо и влево отражает одинаковое количество лучей.

17. Лопасти винта самолета, обращенные к кабине летчика, окрашивают в черный цвет для того, чтобы уменьшить интенсивность отражения солнечных лучей от винта и защитить летчика от их слепящего действия.

18. Вещество перестает быть прозрачным, если входящие в него лучи света благодаря многократным отражениям и преломлениям при переходах между средами воздух-вещество рассеиваются в стороны и сквозь вещество не проходят. В случае стеаринового пятна на бумаге световые лучи не испытывают этих многократных отражений и преломлений, так как стеарин, пропитавший бумагу, делает среду, через которую проходит свет, более однородной.

19. Камера-обскура представляет собой черный непрозрачный ящик, задняя стенка которого закрыта матовым экраном. Лучи света, исходящие от различных точек предмета, проходят через маленькое отверстие в передней стенке ящика и создают на задней стенке ящика (матовом экране) действительное

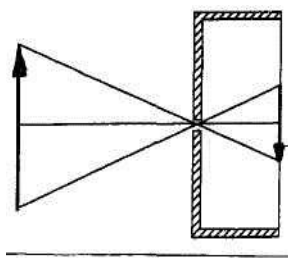


Рис. 28

перевернутое изображение предмета (рис. 28). Фотографический метод регистрации изображений с помощью камеры-обскуры изобрели в 1839 году французы Л. Дагер и Ж. Ньепс. Они обнаружили, что если медную пластину, покрытую иодидом серебра, облучить светом в камере-обскуре, затем обработать парами ртути и зафиксировать в растворе обычной соли, то на пластинке формируется изображение освещаемого предмета. Таким образом в XIX веке было получено много портретов.

Оптимально резкое изображение получается, когда радиус отверстия $r = 0,97\sqrt{\lambda d}$, где λ – длина волны света, d – расстояние от отверстия до экрана. При большем отверстии четкость изображения или фотографии ухудшается, при меньшем – возникает дифракционная картина (отклонение от прямолинейного распространения, обусловленное волновой природой света).

Камера-обскура создает хроматические аберрации (искажения), поскольку для данного диаметра отверстия оптимальное расстояние от отверстия до экрана (пленки) обратно пропорционально длине волны света, которая может меняться от 0,38 (фиолетовый цвет) до 0,77 мкм (красный).

20. Изображение на стене в темной комнате от небольшого отверстия получается так же, как и камере-обскуре (см. «Камера-обскура»).

21. Форма светового зайчика будет зависеть от формы источника света и от расположения экрана, на который проецируется зайчик. Если отверстие маленькое и источник света Солнце, то на стене получится изображение Солнца. Если источник имеет форму круга, а экран расположен под различными углами по отношению к падающим на него лучам, то зайчик будет иметь форму круга или более или менее вытянутого эллипса.

Точно такая же картина будет наблюдаться для солнечного зайчика, отраженного от маленького осколка зеркала.

В случае, когда размер отверстия будет больше размера изображения на стене, появится зависимость изображения от формы отверстия.

22. Если через маленькое отверстие в листе темной бумаги рассматривать мелкие предметы, находящиеся на небольшом расстоянии от глаза, то изображение предмета на сетчатке будет увеличено с хорошим разрешением. Это происходит из-за того, что отверстие ограничивает рабочую площадь хрусталика. Если человек имеет нормальное зрение, то он хорошо видит предметы на расстоянии 25 см (расстояние наилучшего зрения). Наблюдая предметы через отверстие, можно нормально видеть предметы с увеличением, если они будут располагаться ближе 25 см. Увеличение будет определяться по формуле $R=25/x$, где x – расстояние от хрусталика до предмета.

23. Длина тени провода между столбами в течение дня практически не меняется, так как она всегда примерно равна расстоянию между основаниями столбов.

24. Построим изображение предмета АВ в плоском зеркале CD, поставленном параллельно предмету (рис. 29). Как известно из закона отражения света, изображение А'В' в плоском зеркале расположено симметрично с пред-

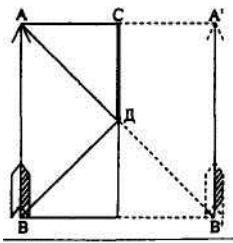


Рис. 29.

метом AB , то есть на таком же расстоянии от зеркала, как и предмет ($CA' = CA$). Из построения ясно, что достаточно иметь такой размер (CD), чтобы из точки A было видно и точку A' , и точку B' . Но $CD = 0,5A'B' = 0,5AB$, то есть достаточно иметь зеркало, равное половине роста человека.

Что касается расстояния от человека до зеркала, то оно, как видно из построения (рис. 29), не играет роли.

Следует заметить, если на стену повесить плоское зеркало под углом, то можно полностью увидеть человека в полный рост и при высоте зеркала меньше половины роста. В этом легко убедиться, построив изображение предмета в наклонном зеркале.

25. Размер видимой части лица в зеркале не изменяется при изменении расстояния от лица до зеркала (см. «Размер зеркала»).

26. Когда закрыт правый глаз, то человек видит левым глазом по лучу 2, 4 бумажку, которая закрывает отражение правого глаза (рис. 30). Когда же человек закрывает левый глаз, то бумажка, преграждая путь лучу зрения 1, 3, закрывает отражение в зеркале левого глаза, то есть он видит, что на изображение закрытого левого глаза наклеена бумажка.

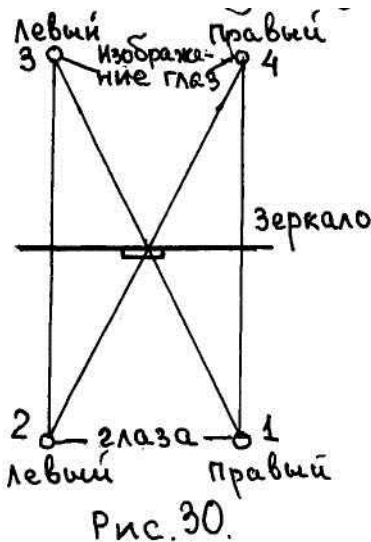


Рис. 30.

27. Рефлекторы, отражающие световой луч точно в направлении источника, даже если его направление не совпадает с осью рефлектора, называются катафотами. Это могут быть сферы, треугольные призмы или системы линз и зеркал. Простейшими катафотами, которые отражают только в одной плоскости, являются два плоских зеркала, расположенные под углом друг к другу, и призма.

Для того, чтобы луч, падающий на одно из зеркал под любым углом в плоскости, перпендикулярной поверхности зеркала, после отражения от обоих зеркал возвращался обратно параллельно первоначальному направлению, необходимо зеркала располагать под углом 90° друг к другу (рис. 31, а). Действительно, из рисунка видно, что после отражения от первого зеркала луч изменяет свое направление на угол 2α , а после отражения от второго – еще 2β . Для того, чтобы после обоих отражений луч шел в обратном направлении, необходимо, чтобы $2\alpha + 2\beta = 180^\circ$ или $\alpha + \beta = 90^\circ$. При этом угол между перпендикулярами к обоим зеркалам составит $\Theta = 180^\circ - (\alpha + \beta) = 90^\circ$. Такой же, разумеется, и угол между зеркалами.

Если вместо зеркал взять призму (рис. 31, б), то луч, падающий на основание призмы под углом α , войдет в призму под углом β , определяемым по закону преломления. Для того, чтобы после полного отражения от боковых граней и выхода из призмы луч вернулся в обратном направлении, он после отражения от второй боковой грани должен падать на основание призмы под углом β . При этом, как видно из рис. 31, б, ход лучей в призме такой же, как между зеркалами. Поэтому и угол при вершине призмы также должен быть равен 90° . Таким образом, осуществить возвращение луча возможно и с помощью

призмы. Для того, чтобы луч при любом направлении падения после возвращения практически полностью сохранял свою энергию, боковые стенки призмы необходимо металлизировать.

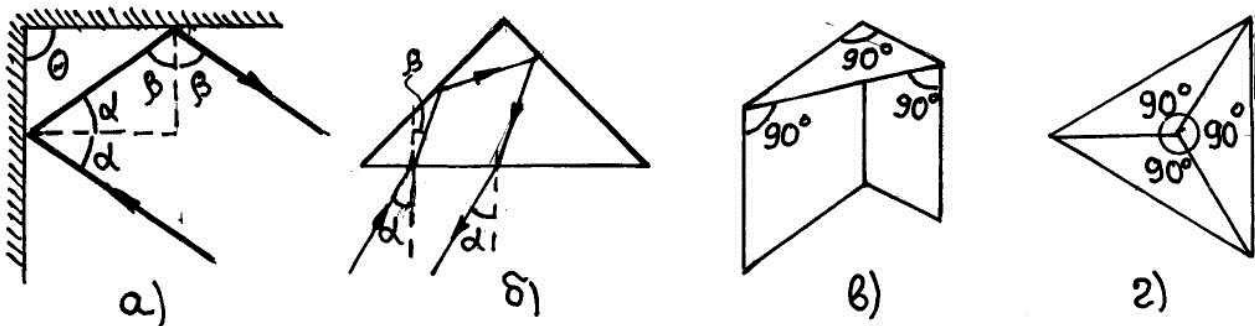


Рис. 31.

Если взаимно перпендикулярно расположены три зеркала (рис. 31, в), то в этом случае, как можно показать, луч света может быть как угодно ориентирован относительно поверхности первого зеркала, на которое он падает, чтобы после отражения от остальных зеркал вернуться в обратном направлении. Вместо зеркал можно использовать стеклянный тетраэдр с прямым трехгранным углом у вершины и одинаковыми металлизированными боковыми гранями в виде равнобедренных прямоугольных треугольников (рис. 31, г). Луч, падающий на основание тетраэдра, после отражения от боковых граней возвращается и выходит в обратном направлении через основание. Подобное оптическое устройство получило название уголкового отражателя.

28. Для ответа на вопрос о количестве изображений в системе плоских зеркал рассмотрим сначала, как получается изображение в одном зеркале. Построение изображения в плоском зеркале основано на применении закона отражения. Пусть над плоским зеркалом (рис. 32) находится светящаяся точка S . Из всех лучей, выходящих из точки S , выберем два луча 1 и 2, которые падают на зеркало под разными углами α_1 и α_2 и после отражения попадают в глаз наблюдателя. Глаз человека воспринимает эти лучи как бы выходящими из точки S_1 , которую можно найти, продолжив лучи в противоположную сторону до пересечения. Следовательно, точка S_1 воспринимается человеком как изображение точки S в плоском зеркале. Это изображение называется мнимым, так как в точке S_1 пересекаются не сами отраженные лучи, а их продолжения; световая энергия в эту точку не поступает.

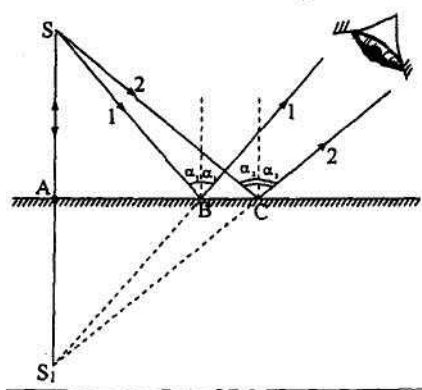


Рис. 32.

Чтобы найти положение точки S_1 , рассмотрим ход лучей 1 и 2, падающих в глаз человека (рис. 32). Рассмотрим треугольники SBC и S_1BC . В этих треугольниках сторона BC общая. Применяя закон отражения, видим, что углы в треугольниках, прилегающие к этой общей стороне, соответственно равны. Следовательно, треугольники равны и совместятся друг с другом, если перегнуть рисунок по линии зеркала. Это означает, что точка S_1 расположена ассиметрично точке S относительно плоскости зеркала. Поэтому для нахождения

изображения точки возможен более простой способ построения: на продолжение перпендикуляра, опущенного на плоскость зеркала из точки S , надо отложить отрезок $S_1A=SA$, и получим положение мнимого изображения S_1 .

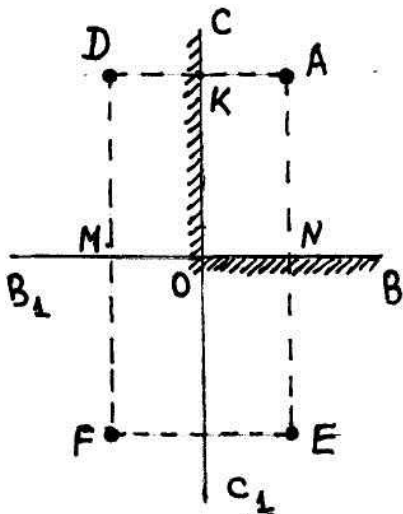


Рис. 33.

Посмотрев на рис. 32, можно обратить внимание на следующую особенность работы зеркала (да и всех оптических систем), что для наблюдения изображения необходима лишь та часть BC зеркала, от которой лучи отражаются непосредственно в глаз. Вся остальная часть зеркала может быть закрыта или даже отрезана. Это не мешает применить указанный простой способ построения изображения. Однако с уменьшением размеров зеркала уменьшается и та область пространства, откуда можно видеть изображение S_1 (так называемая область видения).

Зная, каким образом получается изображение точки в зеркале, рассмотрим, сколько изображений

точки получится во взаимно перпендикулярных зеркалах. Изображение точки A в зеркале OC будет находиться в точке D на расстоянии DK , равном KA (рис. 33), а в зеркале OB – в точке E на расстоянии EN , равном NA . Изображение точки D в зеркале OB получится на его продолжении OB_1 в точке F на расстоянии FM , равном MD . Изображение точки E в зеркале OC получим на его продолжении OC_1 в точке F на расстоянии FL , равном LE . Так как $DK=FL$, а $NE=MF$, то изображение точек D и F попадает в одну точку D . Следовательно, в двух взаимно перпендикулярных плоских зеркалах получается три изображения точки A .

29. Для ответа на вопрос о количестве изображений в плоских зеркалах, стоящих под углом, возьмем точечный объект A , который расположен между зеркалами, образующими друг с другом угол φ ($\varphi < 90^\circ$), в предположении, что число $m = \frac{2\pi}{\varphi}$ – целое. Из точки пересечения зеркал O проведем прямую OA , которая является радиусом-вектором окружности, где лежат все изображения точки A . Радиус-вектор OA образует с поверхностью зеркала 1 угол α_0 и с поверхностью зеркала 2 угол β_0 (рис.34).

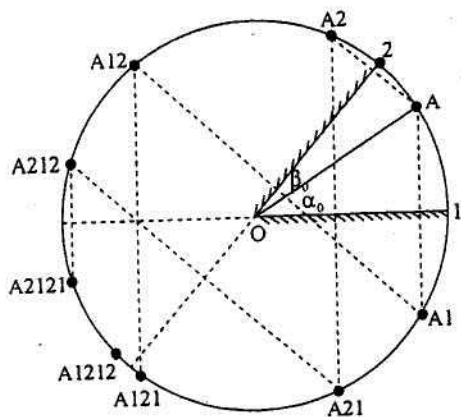


Рис. 34.

Легко увидеть, что для изображений $A_2, A_{21}, A_{212}, A_{2121}, \dots$ угол α имеет следующий ряд значений: $\alpha = 2\varphi - \alpha_0, 2\varphi + \alpha_0, 4\varphi - \alpha_0, 4\varphi + \alpha_0, \dots$. Этот ряд обрывается на изображении, которое первым оказывается со стороны задней поверхности зеркала 1, так как в этом случае лучи от этого изображения уже не смогут отразиться от зеркала 1 (на рис. 34 – это изображение A_{2121}). Аналогично положения изображений $A_1, A_{12}, A_{121}, A_{1212}, \dots$ определяются углами: $\beta = 2\varphi - \beta_0, 2\varphi + \beta_0, 4\varphi - \beta_0, 4\varphi +$

β_0, \dots , причем ряд обрывается на изображении, которое впервые оказывается со стороны задней поверхности зеркала 2 (изображение A1212). Дальнейший ход решения рассмотрим на двух примерах.

В первом примере $m=5$, тогда угол между зеркалами $\varphi = \frac{360^\circ}{5} = 72^\circ$. Рассмотрим вариант, когда $\alpha_0 = 22^\circ, \beta_0 = 50^\circ$. Для верхнего ряда изображений получаем $\alpha=122^\circ, 166^\circ, 266^\circ$, для нижнего $\beta=94^\circ, 194^\circ$. Углы α и β связаны соотношением $\alpha = 2\pi + \varphi - \beta$, или в рассматриваемом случае $\alpha=432^\circ-\beta$. С помощью этого соотношения находим для нижнего ряда $\alpha=432^\circ, 238^\circ$. Следовательно, в верхнем и нижнем рядах нет совпадающих изображений и число изображений будет пять.

Во втором примере $m=6$, тогда $\varphi = 60^\circ$, а углы $\alpha_0 = 20^\circ, \beta_0 = 40^\circ$. Для верхнего ряда изображений $\alpha=100^\circ, 140^\circ, 220^\circ$, для нижнего – $80^\circ, 160^\circ, 200^\circ$ ($\alpha=220^\circ$). Последние изображения в этих рядах совпадают, так что получается всего пять изображений.

Вообще, если m – нечетное, то число изображений равно m . Если же m – четное, то число изображений равно $m-1$. Изложенный метод пригоден и для случая, когда m не есть целое число.

30. Точечный источник света S находится в одной из вершин равностороннего треугольника. Его изображения, даваемые

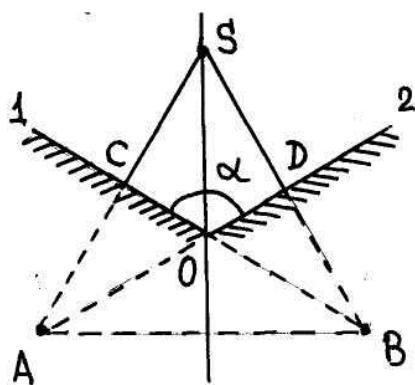


Рис. 35.

двумя зеркалами, лежат в двух вершинах треугольника A и B (рис.35). Для определения положения зеркала 1 делим сторону треугольника AS пополам, так как источник S и его изображение A расположены симметрично относительно зеркала (см. «Изображения во взаимно перпендикулярных зеркалах»). Через точку C проводим плоскость, перпендикулярную стороне AS . Это и будет положение зеркала 1. Рассматривая аналогично сторону треугольника SB , получим положение зеркала 2. Зеркала 1 и 2 пересекаются в точке O . Легко доказать, что угол α между зеркалами равен 120° (рис. 35).

Зеркала 1 и 2 пересекаются в точке O . Легко доказать, что угол α между зеркалами равен 120° (рис. 35).

31. Стержень ED в плоском зеркале AB (рис. 36)

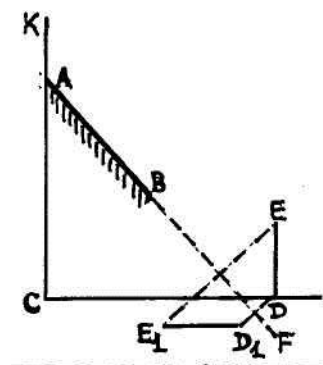


Рис. 36.

можно увидеть, если посмотреть на зеркало сверху вниз. Построение изображения стержня ED будем производить на продолжении зеркала BF (см. «Изображения во взаимно перпендикулярных зеркалах»). Из точки E проводим перпендикуляр на продолжение зеркала BF и в симметричной точке E_1 получаем мнимое изображение одного конца стержня. Таким же образом получаем изображение другого конца стержня в точке D_1 . Соединяя точки E_1 и D_1 , получаем изображение стержня ED .

32. При скорости ветра 2-13 м/с на поверхности водоемов образуется рябь, которую можно представить как множество мелких волн, произвольно

разбросанных по поверхности воды и возникающих одинаково часто во всех направлениях. Крутизна склона волн при этом составляет 20-30°.

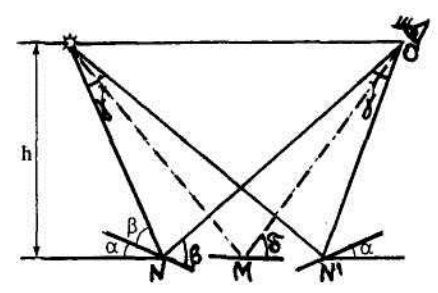


Рис. 37.

Поясним, как свет попадает в глаз при отражении от гребня волны. Для упрощения рассмотрим поместим глаз наблюдателя и источник на одном уровне над поверхностью воды (рис. 37).

Роль разных участков гребня будут выполнять маленькие зеркальца. Горизонтальное зеркальце (впадина волны) будет отбрасывать в глаз наблюдателя (точка O) в том случае, когда расстояния от него до глаза наблюдателя и до источника одинаковы (точка M), если же зеркальце наклонено под углом α в сторону наблюдателя, то для того, чтобы отраженный свет попал в глаза, оно должно быть несколько сдвинуто от наблюдателя (точка N) (один наклон волны). Зеркальце, наклоненное под углом α в противоположную сторону (другой наклон волны), должно находиться в точке N'.

Наклонные положения зеркал аналогичны крайним положениям волн, при которых отраженный от них свет еще попадает в глаз. Расстояние между N и N' поэтому определяет длину световой дорожки (светового пятна). Во всех точках между N и N' найдутся участки волн, имеющие достаточный наклон для того, чтобы отражать лучи в глаз.

Если сместить зеркальце из точки M по направлению NN', то угол δ , под которым мы смотрим на воду, станет меньше. Чем меньше этот угол, тем более вытянутым будет светлое пятно. Если взгляд скользит по поверхности, то пятно света будет до бесконечности вытягиваться и сужаться.

33. Стекланные шары с зеркальной поверхностью, украшающие новогоднюю елку, являются сферическими выпуклыми зеркалами (рис. 38). Зная, где расположен предмет по отношению к сферическому зеркалу, можно графическим построением определить, где получится изображение.

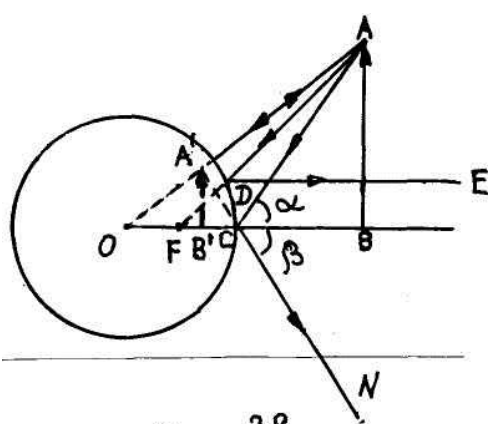


Рис. 38.

При этом построение сводится к выяснению направления падающего и отраженного лучей в соответствии с законом отражения.

Для построения изображения какой-либо точки предмета в сферическом зеркале следует выбирать любые два луча из четырех стандартных (рис. 38):

- а) луч OA, проходящий через оптический центр зеркала O, отраженный луч идет по той же прямой;
- б) луч AF, идущий через фокус зеркала F, отраженный луч DE параллелен главной оптической оси;
- в) луч AC, падающий на зеркало в его полюсе C, отраженный луч CN симметричен с падающим относительно главной оптической оси;

г) луч, параллельный главной оптической оси, отраженный луч проходит через фокус зеркала.

Для построения изображения в выпуклом зеркале в виде сферического шара проведем главную оптическую ось ОСВ, которая проходит через оптический центр О. Получим изображение точки А предмета АВ с помощью двух лучей: луча ОА, проходящего через оптический центр О и луча АС, падающего на зеркало в его полюс С. После отражения эти лучи расходятся, поэтому изображение точки А получим на продолжении этих лучей в точке пересечения А'. Как видно из рис.38, изображение предмета А'В' мнимое, прямое и уменьшенное. При этом не играет роли, какого размера предмет и на каком расстоянии от выпуклого зеркала он находится.

34. Изображение в глазу собеседника возникает на роговице глаза, как в выпуклом зеркале. Как возникает изображение в выпуклом зеркале, мы рассматривали в ответе на вопрос «Изображение в елочном шаре».

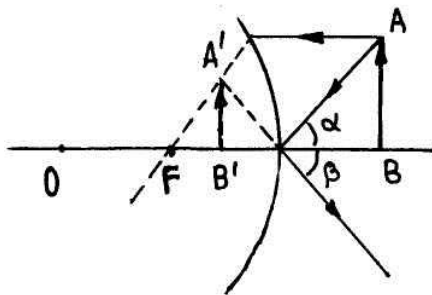


Рис. 39.

35. В выпуклом зеркале изображение предмета, находящегося на любом расстоянии от зеркала, всегда будет уменьшенное (рис. 39) и мнимое (видимое в зеркале). Таким образом, выпуклые зеркала дают широкую область обзора.

36. Для ответа на вопрос, будет ли «отражательный конус» концентрировать световой поток, рассмотрим ход лучей внутри конуса. Луч света, вошедший через основание конуса, падает на внутреннюю боковую поверхность конуса под углом α (точка А) и, отразившись под тем же углом α , падает на противоположную сторону в точку В под углом β (рис. 40). Из построения хода луча видно, что угол β меньше угла α , то есть при каждом следующем отражении от внутренней поверхности конуса угол падения уменьшается.

Если проследить за ходом луча внутри «отражательного конуса», то можно заметить, что лучи с каждым отражением все медленнее и медленнее приближаются к выходу, потом начинают направляться в обратную сторону и выходят через основание О. При увеличении угла падения входящего луча α точка, когда лучи начинают

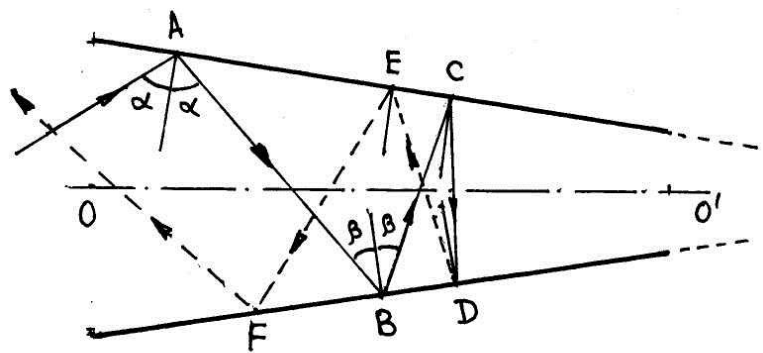


Рис. 40.

идти в обратном направлении, приближается к выходу из конуса О'. При некотором значении угла падения луча α небольшая часть лучей все-таки достигает отверстия О' и выходит из него. При этом чем меньше отверстие, тем меньше мощность выходящего потока.

37. Получить широкий поток параллельных световых лучей с помощью вогнутого сферического зер-

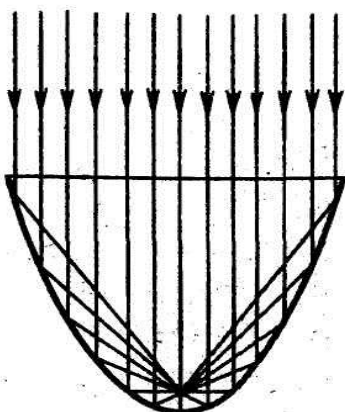


Рис. 41.

кала невозможно, так как лучи, идущие на удалении от главной оптической оси, начинают расходиться. Чтобы такое не происходило, необходимо по мере удаления от главной оптической оси менять радиус кривизны. Таким зеркалом может быть параболоид вращения.

Направим лучи строго параллельно оси параболоида (рис. 41). В параболоиде все прямые, параллельные оси, сходятся после отражения в геометрической точке, являющейся фокусом параболоида, то есть все идущие к параболоиду параллельные лучи сконцентрируются в одной точке.

Можно теперь представить себе обратную картину и поставить вопрос о том, где должен находиться источник излучения, который давал бы поток параллельных лучей. Учитывая обратимость световых лучей, можно утверждать, что такой источник должен находиться в фокусе параболоида, при этом этот источник должен быть точечным. Но и в этом случае на практике лучи будут не строго параллельны.

38. Показатель преломления n вещества зависит от частоты светового излучения ν (длины волны λ); это явление носит название дисперсии света. В области коротких длин волн видимого излучения показатель преломления имеет максимальное значение и затем убывает с увеличением длины волны. Вследствие дисперсии света узкий пучок белого света, проходя сквозь призму из стекла или другого прозрачного вещества, образует на экране, установленном за призмой, радужную полоску. Дисперсия света экспериментально была обнаружена в 1672 году И. Ньютоном. Так как показатель преломления имеет различные значения для разных длин волн в видимом спектре, то измерения показателя преломления для всех веществ проводятся при одной и той же монохроматической длине волны. Такой длиной волны является желтая линия спектра излучения натрия ($\lambda=593,3$ нм), которая приходится на середину видимого спектра. Все табличные значения показателя преломления относятся к желтой линии натрия.

39. Для того, чтобы на сетчатке получалось отчетливое изображение, хрусталик глаза, который является линзой, должен преломлять световые лучи, идущие от рассматриваемого предмета. В основном (примерно на две трети) преломление происходит на внешней поверхности хрусталика глаза. Если человек смотрит под водой, то вода касается глаза и световые лучи, попадая из воды в глаз, практически не преломляются, так как показатель преломления вещества глаза примерно равен показателю преломления воды. Когда человек, плавая в воде, надевает специальные очки и маску, то перед глазами остается слой воздуха, и преломление света происходит нормально.

40. У четырехглазой рыбы, которая может видеть одновременно в воде и в воздухе, глаза разделены на две части, покрытые слоем эпителия, каждая из которых имеет свою роговую оболочку и сетчатку. Хрусталик глаза обладает яйцевидной формой и может концентрироваться сразу на двух объектах (в воде и под водой). Для компенсации уменьшения преломляющей способности той части глаза, которая погружена в воду, участок хрусталика, преломляющий свет от подводных объектов, имеет большую кривизну.

41. Человек мог бы стать невидимым, если бы коэффициент преломления его тела оказался бы равным коэффициенту преломления воздуха (который чуть больше единицы – 1,000292). При большем коэффициенте преломления тела лучи света, проходящие сквозь человека-невидимку, несколько преломились бы и искажение изображений находящихся за человеком предметов (особенно заметное при его движении) делало бы его присутствие заметным.

Для того, чтобы человек мог видеть, он должен поглощать некоторое количество света. Такое поглощение должно быть достаточно малым, чтобы человек не был видимым, коэффициент преломления его должен выражаться комплексным числом, действительная часть которого близка к 1, а мнимая достаточна для того, чтобы поглощать количество света, необходимого для зрения, но не слишком велика, так чтобы поглощение света телом не стало заметным.

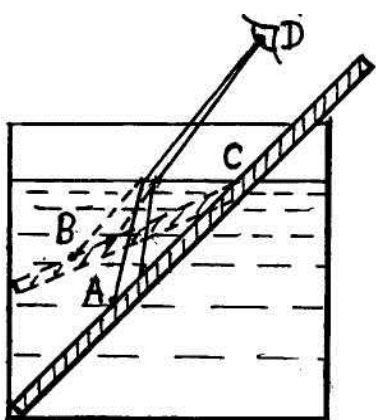


рис. 42.

42. Из-за преломления света на границе раздела двух сред (например, воздух-вода) наблюдается кажущееся изменение размеров, форм и расположения предметов. Возьмем тонкостенный стеклянный стакан с водой, опустим в воду тонкий металлический стержень (рис. 42) и будем рассматривать сверху подводную часть стержня (например, точку А). Участок стержня в области точки А кажется наблюдателю (глаз которого находится над водой в точке D) в приподнятом положении: лучи преломляются и переходят из воды в воздух, попадают в глаз, который видит точку А на продолжении прямой в точке В (глаз человека луч не преломляет). Чем сильнее наклоняются лучи, тем выше поднимается точка А. Таким образом, стержень кажется сломанным у поверхности воды в точке С. Аналогично ведет себя ложка в стакане.

Если рассматривать стакан с ложкой сбоку и чуть сверху, часть стержня, находящегося в воде, кажется сдвинутой в сторону (ложка как бы разрезается и чуть сдвигается) (рис. 21)). Происходит этот сдвиг, так как от части ложки, находящейся в воде, лучи идут преломляясь, а от части, находящейся в воздухе, лучи идут не преломляясь.

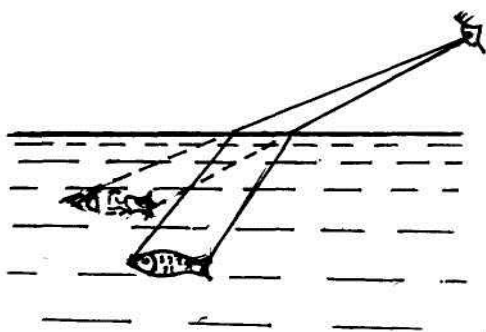


рис. 43.

43. Если смотреть на рыбу в водоеме под некоторым углом к поверхности воды, то из-за преломления на границе раздела воздух-вода рыба будет казаться в приподнятом положении, так как лучи света от рыбы, переходя из воды в воздух, попадают в глаз рыбака и он видит рыбу на продолжении лучей, идущих в воздухе (рис. 43). Следовательно, если рыба будет направлять острогу на кажущееся изображение, он в рыбу не попадет. Необходимо иметь определенный опыт, чтобы направлять острогу ниже кажущегося в точку, где находится рыба.

Если смотреть на рыбу по вертикали сверху вниз, то кажущееся изображение рыбы будет также подниматься, но по направлению наблюдения. Так как кажущееся изображение рыбы и сама рыба находятся на одной прямой, то вертикальный удар острогой не приведет к промаху, за исключением случая, когда острога будет короче расстояния до рыбы.

44. Участок дна водоема кажется наблюдателю в приподнятом положении: лучи преломляются на границе раздела воздух-вода и, переходя из воды в воздух, попадают в глаз, который видит участок дна на продолжении этих лучей, то есть приподнятым над дном (см. ответ «Сломанная чайная ложка»). Чем наклоннее будут лучи, тем выше поднимается дно водоема. Поэтому более удаленные точки дна как бы поднимаются выше.

45. Светлый промежуток на тени от карандаша возникает вследствие капиллярных явлений, при которых вода в результате смачивания поднимается по карандашу и ее поверхность вблизи карандаша искривляется. Лучи света преломляются на искривленной поверхности воды так, что на тени от карандаша появляется светлый промежуток (лучи света в толще воды не будут параллельны) (рис. 44).

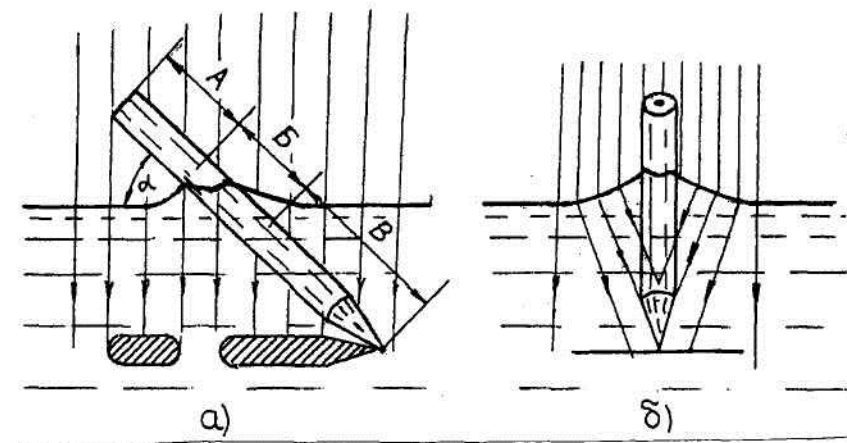


Рис. 44 .

Рассмотрим, как образуется светлый промежуток. Пусть на карандаш, погруженный в воду наполовину под некоторым углом α , падает вертикально параллельный пучок лучей света. Лучи света, падающие на участок А выше искривленной поверхности воды и на участок В ниже искривленной поверхности, дают геометрическую тень (рис. 44, а). Те же лучи, которые падают на искривленную поверхность воды в результате смачивания карандаша (участок Б), в результате преломления заходят в область геометрической тени и создают освещаемый светлый промежуток (рис. 44, б). Ширина светлого промежутка на тени зависит от угла наклона карандаша к поверхности воды (рис. 44, а).

46. Если сахар не размешан, то коэффициент преломления жидкости в сосуде меняется с глубиной, причем так, что у дна, где концентрация сахара самая высокая, он максимален. Когда луч лазера входит в сосуд с небольшим наклоном вниз, он непрерывно загибается в сторону слоя с большим коэффициентом преломления. Наклон луча увеличивается по мере того, как он входит в оптически более плотные слои жидкости. Затем луч отражается от поверхности

дна и снова проходит слои жидкости с непрерывно меняющимся коэффициентом преломления и опять загибается.

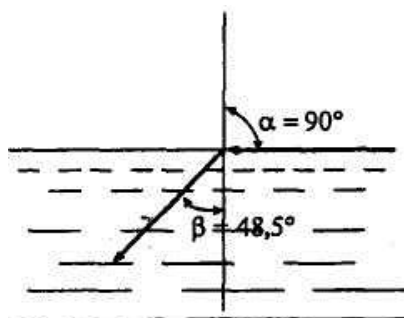


Рис. 45.

47. Прежде чем переходить к вопросу, как видит рыба из-под воды, проследим за ходом лучей, идущих из воздуха в воду и обратно. Когда лучи идут из воздуха в воду, то преломленный луч всегда будет иметь угол преломления β меньше, чем угол падения α , так как по закону преломления $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1}$, где n_1 – показатель преломления воздуха, $n_1=1$, n_2 – показатель преломления воды, $n_2=1,33$. Когда лучи в воздухе будут приближаться к «перпендикулярному» падению (рис. 45), то, скользя по поверхности воды, они падают на водную поверхность почти под прямым углом к перпендикуляру.

В воду лучи попадают под углом $48,5^\circ$, так как $\beta = \arcsin\left(\frac{n_1 \sin 90^\circ}{n_2}\right) = \arcsin 0,75 = 48,5^\circ$. Под большим углом к перпендикуляру, чем $48,5^\circ$, луч попасть в воду не может. Поэтому лучи, падающие на воду под всевозможными углами (180°), сжимаются под водой в довольно тесный конус с углом раствора $48,5^\circ + 48,5^\circ = 97^\circ$.

Если рассмотрим ход лучей, идущих обратно из воды в воздух, то по законам оптики будут те же самые и все лучи, заключенные в упомянутом 97° конусе, выйдут в воздух под различными углами, распределяясь по всему 180° градусному пространству над водой. Те лучи, которые будут идти из воды в воздух под углами больше $48,5^\circ$, не выйдут из-под воды, отразятся целиком от ее поверхности как от зеркала, то есть всякий луч, падающий на поверхность раздела вода-воздух под углом, больше «предельного» (в нашем случае больше $48,5^\circ$), не преломляется, а только отражается: он претерпевает «полное внутреннее отражение».

Зная рассмотренные закономерности в ходе лучей из воздуха в воду и обратно, можно дать ответ на вопрос о том, как будет выглядеть окружающий нас мир, если на него будет смотреть рыба из воды. Облака, висящие над водой, не изменят своего вида, так как вертикальный луч не преломляется. Все остальные предметы и сооружения, стоящие на берегу водоема, лучи от которых падают к поверхности воды под острыми углами, будут выглядеть искаженными: они как бы сожмутся по высоте – и тем сильнее, чем острее угол между водной

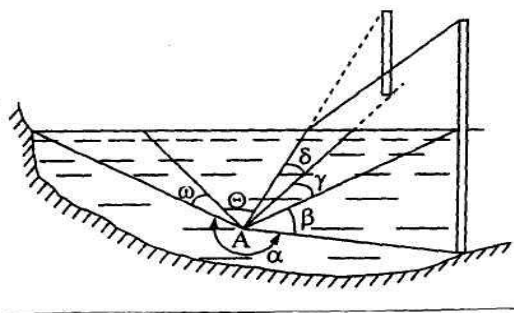


Рис. 46.

гладью и лучом. Действительно, весь мир, видимый под водой, должен уместиться в тесном подводном конусе; 180° должны сжаться почти вдвое – до 97° , изображения неизбежно будут искажаться. А какой вид будет у водной поверхности? Из-под воды она будет выглядеть не плоской, а в форме конуса, бока которого будут наклонены друг к другу под углом 97° .

За краями конуса расстилается блестящая поверхность воды, к которой как в зеркале отражаются подводные предметы. Но самый необычный вид приобретают предметы, которые частично погружены в воду, а частично выступают над ней. Пусть в воде стоит столб, выступающий из воды (рис. 46). Что увидит наблюдатель, находящийся под водой в точке А? Разделим обозреваемое им пространство (360°) на участки и рассмотрим каждый участок отдельно. В пределах угла α он видит дно реки, если оно хорошо освещено. В пределах угла β он увидит подводную часть столба без искажений. Примерно в пределах угла γ он увидит отражение той же части столба, то есть перевернутую погруженную часть столба (полное внутреннее отражение). В пределах угла δ наблюдатель, находящийся под водой, увидит выступающую из воды часть столба, - но она не будет продолжением подводной, а переместится гораздо выше, отделившись от своего основания. В пределах угла θ виден весь надводный мир, в том виде, как уже было рассмотрено выше. В пределах угла ω видно отражение дна от нижней поверхности воды.

48. Показатель преломления в среде зависит от длины волны падающего излучения, то есть для различных цветов спектра будет разный показатель преломления. Это явление носит название – дисперсия света, при котором для лучей красного цвета показатель преломления меньше, чем для других цветов. Самый большой показатель преломления у синего и фиолетового цветов. Следовательно, фокусное расстояние хрусталика глаза, как для любой линзы, различно для различных длин волн. Красные лучи преломляются слабее, так как имеют

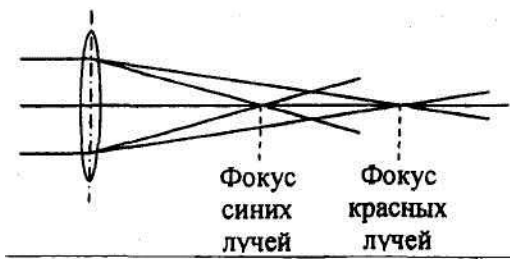


Рис. 47.

меньший показатель преломления, поэтому возникает зрительное впечатление, что красные предметы находятся ближе к наблюдателю, чем синие (рис. 47).

49. В любой среде скорость распространения света зависит от плотности вещества. В воздухе скорость мало отличается от скорости света в вакууме. В воде скорость света меньше, чем в вакууме, в 1,33 раза, в стекле – в 1,5 раза, в алмазе – в 2,42 раза. Число, показывающее, во сколько раз меньше скорость света в данном веществе, чем в вакууме, называется показателем преломления. При переходе из одной среды в другую, например, из воздуха в воду, происходит изменение направления движения луча света. Точно так же, когда камень летит из воздуха в воду под некоторым углом α к перпендикуляру, восстановленному в точку падения к границе раздела воздух-вода (рис. 48). Изменение направления луча на границе раздела называется преломлением.

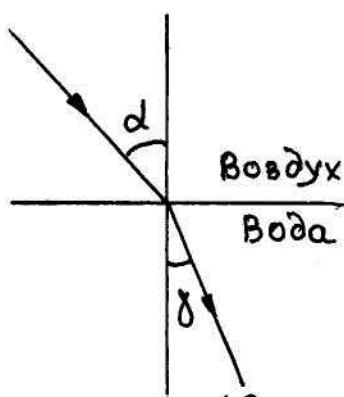


Рис. 48.

Изменение направления луча на границе раздела называется преломлением.

Преломление используется в линзах для получения уменьшенного или увеличенного изображения предмета. У глаза человека имеется хрусталик, который выполняет роль линзы. Хрусталик дает четкое уменьшенное изображе-

ние предметов на сетчатке, если луч света идет из воздуха (показатель преломления $n=1$) в хрусталик (показатель преломления вещества хрусталика $n=1,43$). Если человек находится в воде (у воды показатель преломления $n=1,33$), то преломляющая способность хрусталика ослабляется. Поэтому под водой изображение в глазу человека получается далеко позади сетчатки, на самой сетчатке изображение будет вырисовываться смутно (будет размытое) и различить что-либо можно лишь с трудом. Только очень близорукие люди видят под водой более-менее нормально.

Теперь очень легко можно понять, зачем водолазу шлем, аквалангисту маска, а пловцу специальные очки. Все эти устройства снабжены плоскими стеклами; они отделяют глаз от воды слоем воздуха. Лучи света, выходя из воды и пройдя через стекло, попадают в воздух, а уже затем в глаз, то есть хрусталик в этом случае находится при нормальных для него условиях. Лучшая иллюстрация этой ситуации – то, что мы хорошо видим рыб, плавающих в аквариуме.

50. Луч, вошедший в стержень под углом α , идет в стекле после преломления под углом β , определяемый по закону преломления:

$$\sin\beta = \frac{\sin\alpha}{n}. \quad (1)$$

На боковую поверхность стержня этот луч должен падать под углом меньше предельного для полного внутреннего отражения. Из рис.24 видно, что этот угол равен $90^\circ - \beta$, и тогда по условию предельного угла

$$\sin(90^\circ - \beta) = \cos\beta \geq 1/n. \quad (2)$$

Максимальное значение β при $\alpha=90^\circ$ из (1)

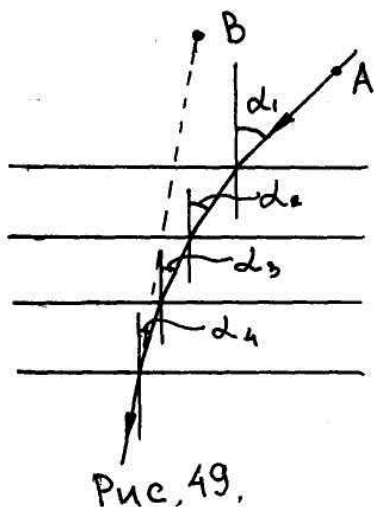
$$\sin\beta = 1/n. \quad (3)$$

Возведя в квадрат (2) и (3) и складывая, получим $1 \geq \frac{2}{n^2}$ и $n \geq \sqrt{2}$.

Явление «запирания» луча в стержне широко используют в так называемой волоконной оптике. При достаточно малом поглощении света в стекле луч может быть передан на большие расстояния. Пучки тонких стержней (волокон) образуют кабели, по которым можно передавать информацию с большой надежностью и без помех. С помощью таких кабелей можно также освещать внутренние органы человека, что в настоящее время используют в медицине с диагностической целью.

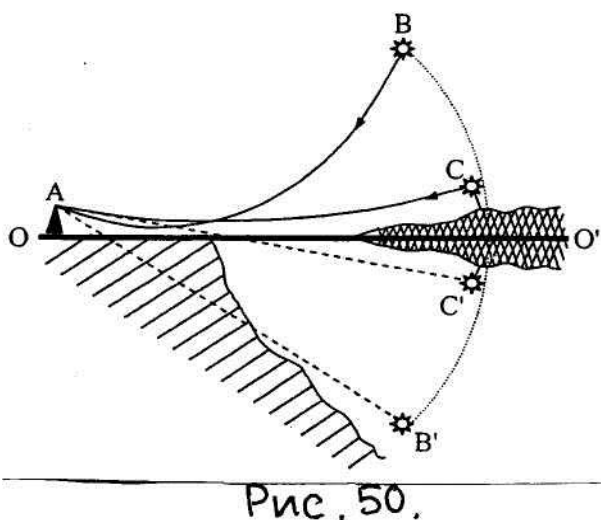
51. Для объяснения многих оптических явлений необходимо знать, как ведет себя луч света при переходе из одной оптической среды в другую. При переходе луча света из среды 1 с показателем преломления n_1 ($n_1 = \frac{c}{v_1}$, где c – скорость света в вакууме, v_1 – скорость света в данной среде; скорость v всегда меньше c и зависит от плотности среды) в среду с показателем преломления n_2 происходит преломление луча (среда 2 оптически более плотная среда, $n_2 > n_1$). В оптически более плотной среде луч сильнее прижимается к нормали, то есть $\alpha_2 < \alpha_1$.

При прохождении света в атмосфере происходит искривление хода световых лучей, вызванное оптической неоднородностью атмосферного воздуха. Речь идет об изменениях (флуктуациях) плотности воздуха (а значит, и показателя преломления) с высотой или при нагревании или охлаждении.



Преломление происходит в слоистой атмосфере, и траектория светового луча, приходящего к наблюдателю от некоторого объекта (А), должна иметь вид ломаной линии (рис. 49). Глаз считает, что луч прямой, то есть он видит объект в точке В. В действительности, плотность атмосферы, а следовательно, и показатель преломления с высотой изменяется не скачками а непрерывно. Поэтому световой луч представляет собой не ломаную, а плавную линию.

Нижний (озерный) мираж объясняется следующим образом. Если воздух у самой поверхности земли сильно нагрет и, следовательно, его плотность относительно мала, то показатель преломления у поверхности земли будет меньше, чем в более высоких воздушных слоях. Лучи света, идущие из голубого неба, идут из оптически более плотных слоев воздуха в менее плотные, поэтому они вблизи поверхности земли будут изгибаться так, чтобы их траектория была обращена выпуклостью вниз (рис. 50).



Пусть в точке А находится наблюдатель. Световые лучи от некоторого участка голубого неба попадают в глаз наблюдателя, испытав искривление (луч ВА) (рис. 50), но он воспринимает лучи как прямые, а это означает, что наблюдатель увидит соответствующий участок небосвода, не над линией горизонта OO' , а ниже ее в точке В' (см. штриховую прямую на рис. 50). Ему будет казаться, что он видит воду, хотя на самом деле перед ним изображение голубого неба. Теперь рассмотрим ситуацию, когда у линии горизонта находятся холмы, пальмы или

иные объекты, тогда благодаря искривлению лучей наблюдатель увидит их перевернутыми и воспримет как отражение соответствующих объектов в несуществующей воде. На рис.50 показано, как получается отражение пальмы С в точке С'. Так возникает иллюзия, представляющая собой «озерный» мираж.

Эффект реальности несуществующего водоема усиливается дрожанием изображения воды, обусловленным флуктуацией коэффициента преломления горячего воздуха. Создается впечатление течения или волнения воды.

52. Если воздух у поверхности земли или воды не нагрет, а, наоборот, сильно охлажден по сравнению с более высокими слоями, то световые лучи, идущие от объекта, будут изгибаться так, что их траектория будет обращена выпуклостью вверх. Поэтому наблюдатель, находящийся в точке А (рис. 51),

может видеть объекты за горизонтом и будет видеть их как бы висящими над линией горизонта (рис. 51).

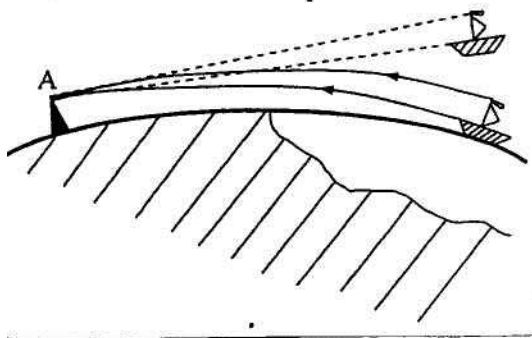


Рис. 51.

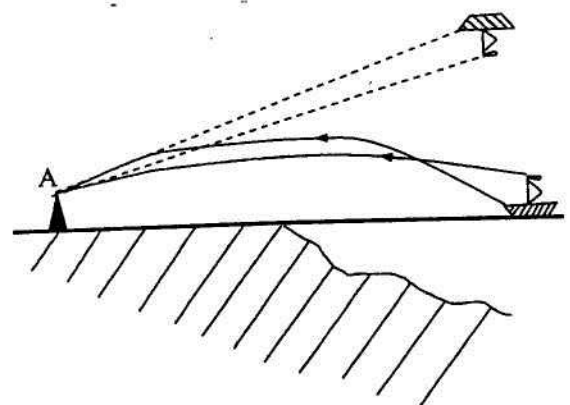


Рис. 52.

Верхние миражи бывают прямые, когда коэффициент преломления воздуха уменьшается с высотой относительно медленно. При быстром уменьшении коэффициента преломления образуется перевернутое изображение (рис. 52).

Если коэффициент преломления воздуха с высотой уменьшается сначала быстро, а затем медленно, то могут возникнуть двойные (одно прямое, другое перевернутое) миражи, а в некоторых случаях даже тройные миражи.

53. Фата-моргана представляет собой более сложный мираж, чем нижний и верхний миражи, поскольку для возникновения такого миража зависимость температуры от высоты должна быть нелинейной, в то время как для возникновения нижнего и верхнего миражей зависимость температуры от высоты должна быть линейной.

Под действием ветра и вертикальных воздушных потоков слой холодного воздуха может искажаться, менять толщину, перемещаться по высоте. Поэтому как верхние, так и нижние миражи будут изменяться со временем, создавая картину сменяющихся друг друга видений. Так возникает знаменитая фата-моргана.

54. Природа сверхдальних миражей изучена хуже всего, однако это не говорит о том, что о них ничего не известно. Ясно, что воздух должен быть прозрачным, свободным от загрязнений и водяных паров. Должен образоваться устойчивый слой охлажденного воздуха на некоторой одинаковой высоте над поверхностью земли. Ниже и выше этого слоя воздух должен быть немного теплее. Световой луч, попавший внутрь плотного холодного слоя воздуха, оказывается как бы запертым внутри него и распространяется в нем как по своеобразному световоду (как бы происходит полное внутреннее отражение). Траектория луча все время обращена выпуклостью в сторону менее плотных областей воздуха.

Возникновение сверхдальних миражей можно объяснить распространением лучей внутри подобных световодов, которые иногда создает природа. Правда, такое объяснение нельзя считать исчерпывающим. Возможно, что при таких условиях в атмосфере образуются своеобразные воздушные линзы, а также возникают вторичные миражи (миражи от миражей). Возможно, наконец,

что определенную роль в возникновении сверхдальних миражей играет ионосфера (слой ионизированного газа на высотах от 70 до 100 км), которая способна отражать световые волны.

55. Плотность воздуха атмосферы земли плавно изменяется; чем выше, тем меньше плотность. При изменении плотности меняется также показатель преломления от точки к точке. Поэтому траектория лучей света в атмосфере представляет собой плавно искривляющиеся линии (рефракция света в атмосфере). Если бы атмосфера исчезла, то свет распространялся бы прямолинейно, поэтому в отсутствии атмосферы видимое положение звезд несколько сместилось бы. Например, звезды, видимые вблизи линии горизонта, стали бы невидимыми.

56. Вид изображения стрелки не изменится, так как любая часть линзы работает как целая линза, но изменяется освещенность изображения. Так как половина линзы свет не пропускает, то освещенность уменьшается в среднем в два раза: у одной половины стрелки уменьшение будет несколько больше, чем в два раза, у другой – несколько меньше, чем в два раза.

57. Освещенность изображения E равна отношению светового потока Φ , проходящего через линзу, к площади изображения S . При сравнении освещенностей для двух рассматриваемых случаев отношение

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} \cdot \frac{S_1}{S_2}$$

Так как освещенность поверхности линз солнечными лучами в обоих случаях одна и та же, то отношение световых потоков равно отношению площадей линз – целой и разрезанной пополам. Это означает, что $\Phi_2/\Phi_1=1/2$.

Теперь найдем отношение площадей изображения. Изображение Солнца лежит в фокальной плоскости линзы; так как Солнце находится очень далеко от

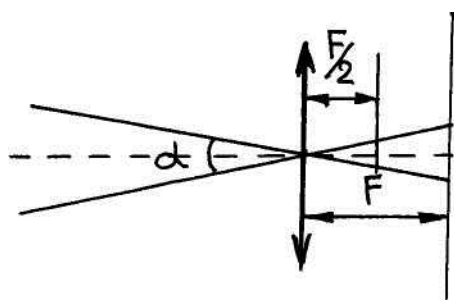


Рис. 53.

Земли, то на линзу падает параллельный пучок лучей, собирающихся в фокальной плоскости линзы. Если фокусное расстояние линзы F , а угол, под которым видно Солнце с Земли, α (это угол между пучками лучей, идущих от крайних точек Солнца), то, как видно из рис.53, радиус изображения Солнца равен $r = Ftg \frac{\alpha}{2}$.

Так как угол α очень мал ($\alpha \approx 30'$), то $tg \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}$ и $r = \frac{F\alpha}{2}$. Для нахождения размера изображения

во втором случае необходимо знать фокусное расстояние составной линзы.

Оптическая сила системы линз, сложенных вплотную, равна сумме оптических сил линз, входящих в систему. Фокусное расстояние сложной линзы F' найдем по формуле

$$\frac{1}{F'} = \frac{1}{F} + \frac{1}{F} = \frac{2}{F}, \quad F' = F/2.$$

Таким образом, фокусное расстояние F' линзы, составленной из двух половинок плосковыпуклой линзы, вдвое меньше расстояния целой линзы. Поэтому радиус изображения Солнца во втором случае будет меньше (рис. 53),

чем в первом случае, а площадь изображения – в четыре раза меньше, то есть $\frac{S_1}{S_2} = 4$ и $\frac{E_2}{E_1} = 2$.

Следовательно, освещенность изображения Солнца увеличивается в два раза.

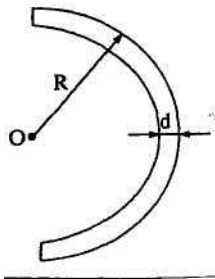


Рис. 54.

58. Оптическая сила линз определяется по формуле $D = \left(\frac{n_{\text{л}}}{n_{\text{ср}}} - 1\right) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$, где $n_{\text{л}}$ – показатель преломления прозрачного материала, из которого изготовлена линза (в нашем случае стекло $n_{\text{л}}=1,5$), $n_{\text{ср}}$ – показатель преломления среды, в которую помещена линза (в нашем случае $n_{\text{ср}}=1$) R_1 – радиус кривизны выпуклой поверхности, $R_1=R=10$ см (рис. 54), $R_2=-(R-d)$. Таким образом, оптическая сила такой линзы равна

$$D = (n - 1) \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R-d}\right) = -(n - 1) \frac{d}{R(R-d)}.$$

Подставляя численные значения, получим

$$D = -(1,5 - 1) \frac{1 \cdot 10^{-3}}{0,1 \cdot 0,099} = -0,05 \text{ дптр}.$$

Отрицательна оптическая сила говорит о том, что получившаяся линза будет рассеивающей.

59. Каждый участок линзы, независимо от других, создает полное изображение предмета, поэтому никаких полос на изображении не получится, так как при фотографировании осла черные полосы будут уменьшать количество света, попадающего на пленку. Изображение просто будет менее ярким. Правда, можно сфотографировать стекло с черными полосками, но тогда не будет видно осла.

60. Вода в тонкостенном стакане, ограниченная цилиндрической поверхностью, выполняет роль собирающей линзы, с помощью которой получается увеличенное изображение предмета, как это происходит в лупе.

61. Если на тонкую линзу падают лучи, параллельные главной оптической оси, то они собираются в одной точке, называемой фокусом. Расстояние от линзы до фокуса является фокусным расстоянием F . Величина, обратная фокусному расстоянию линзы, называется ее оптической силой $D=1/F$. Оптическая сила измеряется в диоптриях (дптр). Для получения оптической силы в диоптриях необходимо фокусное расстояние выражать в метрах.

Если оптическая сила линзы имеет положительное значение, то такая линза будет собирающей. Линзы с отрицательной оптической силой являются рассеивающими. В том случае, если имеется оптическая система из нескольких линз, то оптическая сила системы определяется суммой оптических сил линз, входящих в эту систему. Поэтому для определения, у какой из двух линз, собирающей или рассеивающей, больше оптическая сила, следует их сложить вплотную друг к другу. Если полученная система собирает лучи, оптическая сила собирающей линзы больше. В противном случае большей оптической силой обладает рассеивающая линза.

62. Помещенную рядом со стеной линзу отодвигают от стены до тех пор, пока на ней получится резкое изображение нити электрической лампы. Та лин-

за, которая при таком опыте будет расположена ближе к стене, то есть будет иметь меньшее фокусной расстояние и большую оптическую силу.

63. Глаза кошек и других животных отражают свет в направлении, обратном направлению его прихода, поэтому их видно в темноте. Глаз представляет собой систему из линз и криволинейного зеркала, отражающую свет так, что пучок отраженного света направлен на источник. У плотоядных животных сильное отражение света обусловлено тем, что под сетчаткой находится слой кристаллов цистеина, содержащего цинк.

64. Капли воды, которые остаются на листьях растений при поливе в жаркий солнечный день, являются своеобразными собирающими линзами. Эти «линзы» фокусируют солнечный свет на поверхности листьев. В месте фокусирования листья обугливаются.

65. Лучи света, попадающие в глаз в воздухе, дают изображение предмета на сетчатке; происходит преломление лучей света на границе воздух-вещество хрусталика. В воде лучи света слабо преломляются при переходе из воды в глаз и не дают резкого изображения предметов на сетчатке. Поэтому человек в воде видит несколько хуже, чем на воздухе.

66. Близорукий человек, щуря глаза, как бы уменьшает «диафрагму» зрачка глаза, при этом изображение предметов становится более резким.

67. Проходя через хрусталик глаза, луч от удаленного источника попадает на сетчатку. Этот луч испытывает два преломления на двух поверхностях хрусталика (рис. 55). Согласно закону преломления

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

где n_1 – абсолютный показатель преломления первой среды (воды или воздуха), n_2 – абсолютный показатель преломления вещества хрусталика.

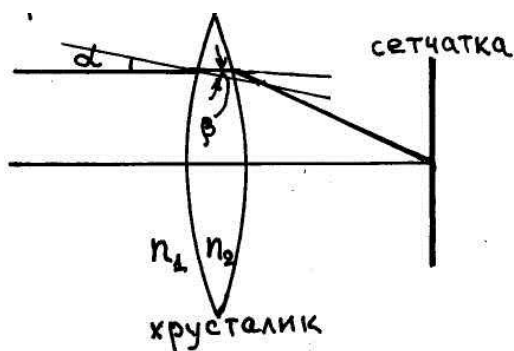


Рис. 55.

Из формулы видно, что при уменьшении n_1 (замена воды на воздух, $n_1=1,33$ у воды и $n_1=1$ у воздуха) угол β уменьшается. Это означает, что после преломления на входной поверхности хрусталика в том случае, когда перед глазом воздух, лучи идут ниже, чем в том случае, когда перед глазами вода. Поэтому если в воде изображение удаленного предмета при ненапряженном глазе образуется на сетчатке, то в воздухе изображение этого предмета при ненапряженном глазе будет

получаться перед сетчаткой. Следовательно, человек сильно близорук и ему необходимо носить очки с рассеивающими линзами, то есть с отрицательной оптической силой.

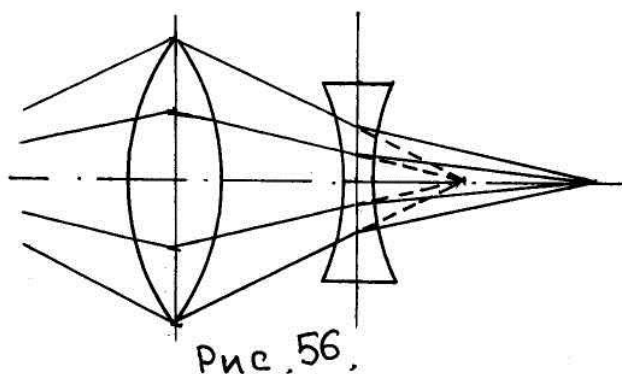
68. Изображение предмета, которое дает хрусталик несовершенного глаза, получается не на сетчатке глаза, а перед ней, если человек близорук, или за ней, если человек дальзорук. В обоих случаях изображение каждой точки на сетчатке глаза получается в виде расплывчатого пятна, диаметр которого зависит от диаметра зрачка и от степени близорукости (или дальзоркости) чело-

века. Чем меньше диаметр зрачка, тем уже пучок лучей, создающих изображение точки, тем меньше получается пятно на сетчатке. При ярком освещении диаметр зрачка уменьшается и изображение букв для людей, носящих не очень сильные очки, оказывается слабо размытым. Поэтому они могут читать без очков.

69. Если озеро глубокое – вода в нем чистая, но она кажется голубой благодаря отражению голубого неба. Мелкая вода кажется зеленоватой из-за отражения света от дна. Загрязнения могут придавать воде различные оттенки вследствие избирательного поглощения или рассеяния света (если в воде имеются взвешенные мельчайшие частицы).

70. Светящиеся столбы можно наблюдать в зимнее время, довольно часто перед закатом и на рассвете, они образуются выше или ниже Солнца. Эти столбы очень красивы, они бывают белыми, бледно-желтыми, оранжевыми, розовыми. Подобные столбы создают зимним вечером также уличные фонари. И в том и в другом случаях столбы обусловлены отражением света от внешней поверхности гексагональных кристаллов льда. Длина кристалла может быть как значительно меньше его толщины (пластинчатые кристаллы), так и значительно превышать его толщину (игольчатые кристаллы). Столбы света могут образовываться на тех и других кристаллах. Пластинчатые кристаллы, падая, ориентируются так, что сопротивление воздуха их движению максимально, то есть располагаются горизонтально. Если в поле зрения наблюдателя пластинки находятся выше Солнца или уличного фонаря, то свет отражается от их нижней поверхности и наблюдатель видит относительно яркую полосу. Если же пластинки находятся ниже Солнца, то свет отражается от их верхней поверхности.

71. На центральную часть линзы лучи падают практически перпендикулярно к поверхности, то есть угол падения очень мал и, соответственно, часть отраженного линзой света также мала по сравнению с теми лучами, которые падают на периферийную часть линзы, где угол падения больше. Таким образом, через центральную часть линзы прохождение света будет более полным.



72. Для того, чтобы с помощью двояковогнутой стеклянной линзы получить в воздухе действительное изображение, необходимо направить на нее сходящийся пучок лучей. Это можно осуществить, поместив перед двояковогнутой линзой, то есть ближе к источнику света, собирающую линзу, имеющую подходящее фокусное расстояние (рис. 56).

73. Лупа не увеличивает углы, так как их величина не зависит от длины сторон; они измеряются радианами или градусами, число которых, естественно, не становится больше.

74. Чтобы фокусное расстояние глаза сохранялось одинаковым и в воздухе и под водой, нужно, чтобы отсутствовало преломление лучей, идущих от

удаленных предметов (т.е. лучей параллельных) на передней поверхности роговицы. Значит, эта поверхность должна быть плоской.

75. Разделить лучи разного цвета в жидкости с помощью тонкой прозрачной пластинки, у которой показатель преломления меньше, чем у жидкости, можно, подставив пластинку под углом к пучку лучей и подобрав этот угол так, чтобы угол падения пучка был заключен между предельными углами полного внутреннего отражения для обоих цветов. Тогда лучи одного цвета отразятся от пластинки, а другого – пройдут через пластинку.

76. На снимке изображения мухи не будет. Она лишь закрывает часть объектива, то есть выполняет роль диафрагмы. Освещенность несколько уменьшится, но изображение предмета останется прежним, так как от всех точек предмета лучи пройдут через объектив.

77. Если расстояние между половинками исчезающе мало, то пучок останется практически параллельным. Если это расстояние велико, но меньше фокусного расстояния каждой из половинок, то пучок параллельных лучей будет преобразовываться с пучок сходящихся лучей (см. ответ «Действительное изображение в рассеивающей линзе»).

При расстоянии между линзами, большем фокусного расстояния каждой из них, параллельный пучок будет превращаться системой в расходящийся пучок лучей.

78. Если тонкая двояковыпуклая линза положена на плоское зеркало, то при помещении точечного источника света в фокус линзы в зеркале мнимое изображение источника будет находиться на расстоянии равном фокусному расстоянию линзы. Поэтому при отражении света от зеркала после прохождения через линзу будет получено действительное изображение источника света, которое совпадает с самим источником.

79. Вогнутое сферическое зеркало и жидкость, налитая в него, создают оптическую систему, состоящую из зеркала и линзы. Зная оптическую силу системы, можно найти ее фокусное расстояние $F=1/D$. Оптическая сила системы равна сумме оптических сил полученной линзы D_1 и зеркала D_2 , $D=D_1+D_2$.

Оптическая сила линзы определяется по формуле $D_1 = \left(\frac{n}{n_{\text{ср}}} - 1\right) \cdot \frac{1}{R}$, где $n_{\text{ср}} = 1$ – показатель преломления окружающей среды (воздуха). Оптическая сила зеркала $D_2=2/R$. Таким образом, оптическая сила системы равна $D = (n - 1) \frac{1}{R} = \frac{n+1}{R}$ и фокусное расстояние - $F = \frac{R}{n+1}$.

80. Добыть огонь с помощью льда можно в солнечный день. Для этого нужно сделать из льда двояковыпуклую линзу, с помощью которой можно собрать падающие на нее параллельные лучи в одну точку. В этой точке можно получить высокую температуру и зажечь горючий материал.

Борисовский Василий Васильевич

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА
(теория и практика)

Учебное пособие для студентов технических направлений
всех форм обучения

Редактор Е.Ф. Изотова

Подписано к печати 27.05.15. Формат 60x84/16.
Усл. печ. л. 3,44. Тираж 50 экз. Зак. 151428. Рег. №59.

Отпечатано в ИТО Рубцовского индустриального института
658207, Рубцовск, ул. Тракторная, 2/6.