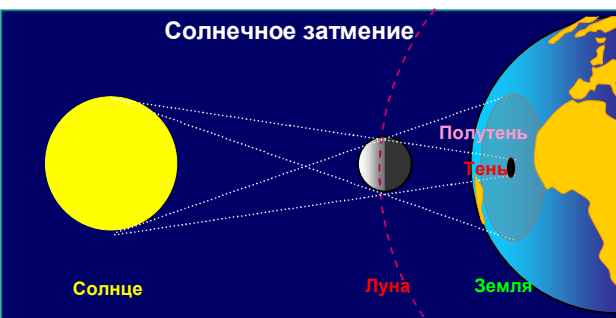
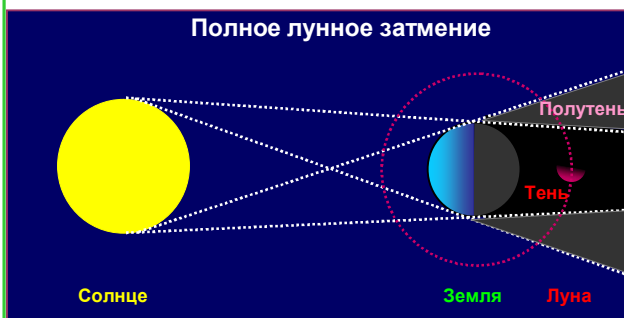
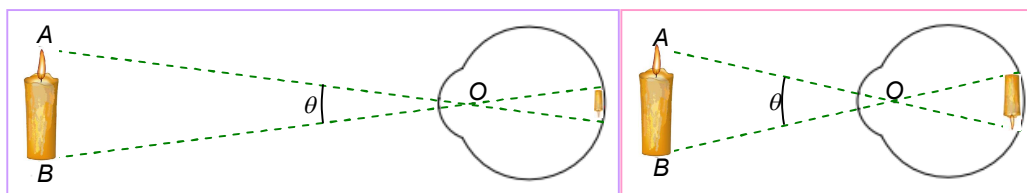
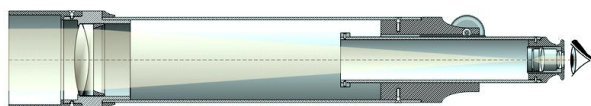
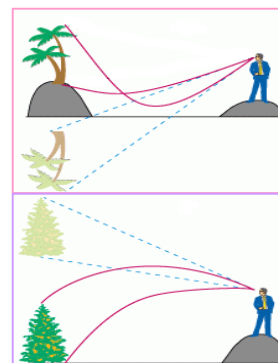
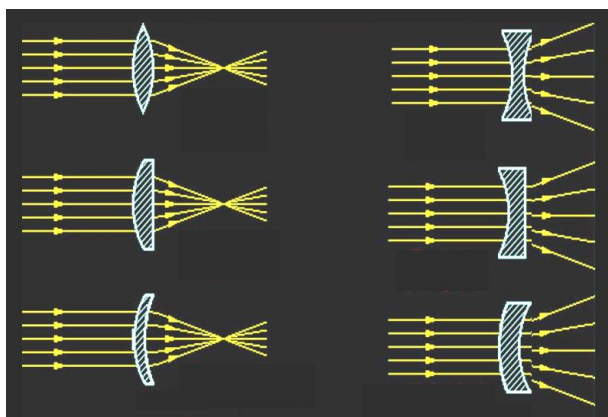
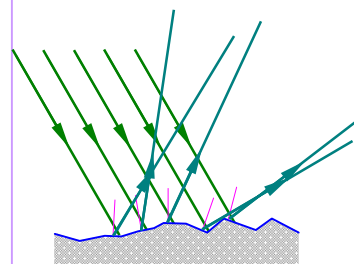
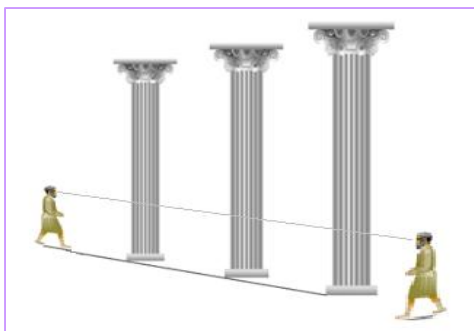
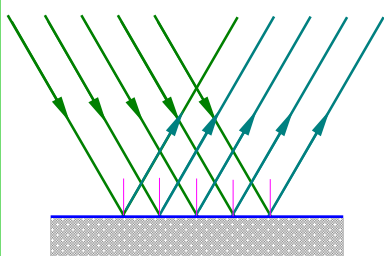




Раздел 3



СВЕТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ



Глава 7 ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

ПРЕДИСЛОВИЕ

Оптика (от др. греч. *optike* *появление, взгляд*) — раздел физики, рассматривающий свойства света и объясняющий связанные с ним явления.

Но что такое *свет*?

Первые представления людей о свете были довольно наивными. Считалось, что из глаз выходят особые щупальца, которыми человек ощупывает все предметы.

Согласно современным представлениям (с которыми вы подробнее познакомитесь в старших классах), свет имеет двойственную природу: с одной стороны это – *электромагнитные волны*, а с другой – поток элементарных частиц – *фотонов*.

В этом разделе вы ознакомитесь с простейшей, но очень полезной теорией – **геометрической (лучевой) оптикой**. В ней рассматриваются законы распространения света в прозрачных средах на основе представлений о свете как о совокупности **световых лучей** — линий, вдоль которых распространяется энергия световых волн. В геометрической оптике не учитываются волновые свойства света и связанные с ними явления.



Если среда, в которой распространяется свет, *однородна*, световые лучи представляют собой прямые линии, что крайне упрощает понимание очень широкого круга оптических явлений. Обычно однородными средами можно считать воздух и другие газы, а также воду и некоторые другие жидкости.

Таким образом, геометрическая оптика очень полезная теория в силу своей простоты и достаточной общности.

К числу основных законов геометрической оптики относятся:

1. закон прямолинейного распространения света;
2. закон независимости распространения световых лучей;
3. закон отражения света;
4. закон преломления света.

Свет распространяется в пространстве с огромной скоростью. В вакууме его скорость равна $c=299\,792\text{ км/с}\approx 300\,000\text{ км/с}$.

Двигаясь с этой скоростью, свет проходит расстояние от Луны до Земли в 384 000 км за 1,2 с, расстояние от Солнца до Земли в 149 000 000 км за 8 мин, а расстояние от ближайшей к нам звезды альфа Центавра за 4 года.

Скорость света в веществе v всегда меньше, чем в вакууме:

$$v < c.$$

Так, в воздухе скорость света равна 299 710 км/с, в воде 225 300 км/с, а в стекле – 200 000 км/с.

Из двух сред та, в которой скорость света меньше, называется оптически более плотной, а та, в которой скорость света больше, — оптически менее плотной. Например, вода является оптически более плотной средой, чем воздух, а стекло — оптически более плотной средой, чем вода.

§ 62. ИСТОЧНИКИ СВЕТА. РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА

1⁰. Еще в глубокой древности ученые интересовались природой света. Что такое свет? Почему одни предметы цветные, а другие белые или черные?

Было замечено, что свет нагревает тела, на которые он падает. Следовательно, он передает этим телам энергию. Вам тоже известно, что одним из видов теплопередачи является излучение. **Свет – это электромагнитное излучение**, но лишь та очень небольшая его часть, которая воспринимается глазом, *рис.1*. В этой связи свет называют **видимым** или **оптическим излучением**.

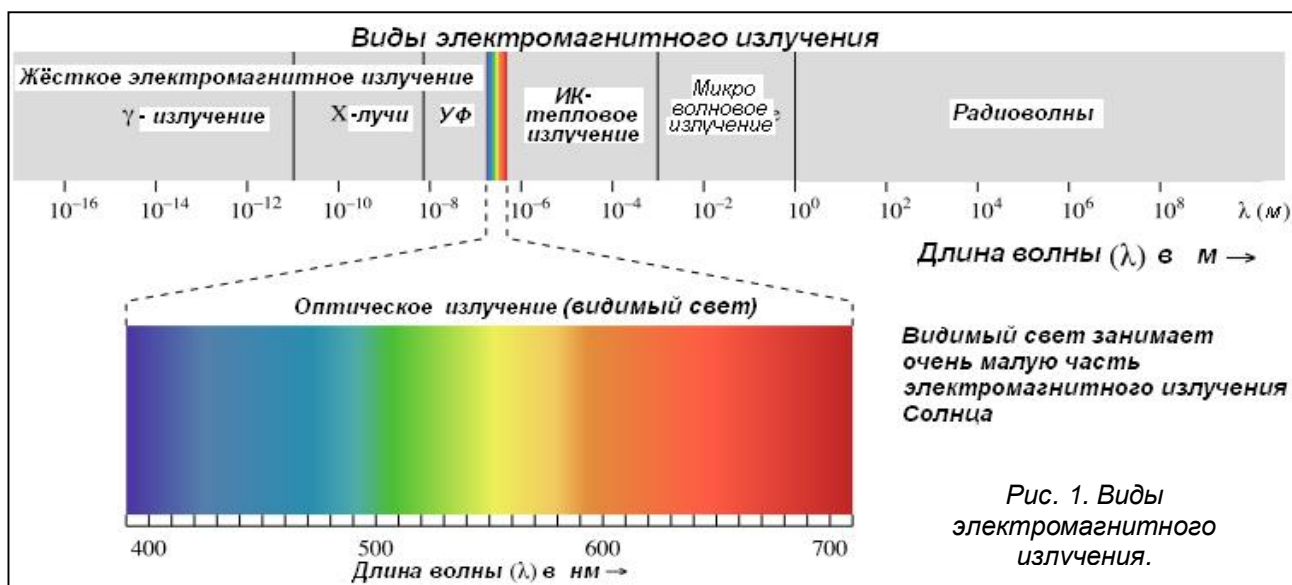


Рис. 1. Виды электромагнитного излучения.

Поскольку свет — излучение, ему присущи все особенности такого вида теплопередачи. Это значит, что перенос энергии может осуществляться в вакууме, а энергия излучения частично поглощается телами, на которые оно падает. Вследствие чего тела, на которые падает излучение, нагреваются.

2⁰. Тела, от которых исходит свет, называются **источниками света**. Они могут быть *естественные (созданные природой)* и *искусственные (созданные человеком)*, *рис. 2÷3*.



Рис. 2. Естественные источники света: Солнце, пламя, молнии, звёздное небо, северное сияние, светящиеся водоросли в морях и озёрах, глубоководные животные, рыбы, грибы.

К естественным источникам относятся Солнце, звезды, атмосферные разряды, светящиеся объекты животного и растительного.

К искусственным – различные осветительные приборы, светящаяся реклама, экраны и индикаторные лампочки приборов.

3⁰. По затратам энергии источники света можно разделить на «горячие»

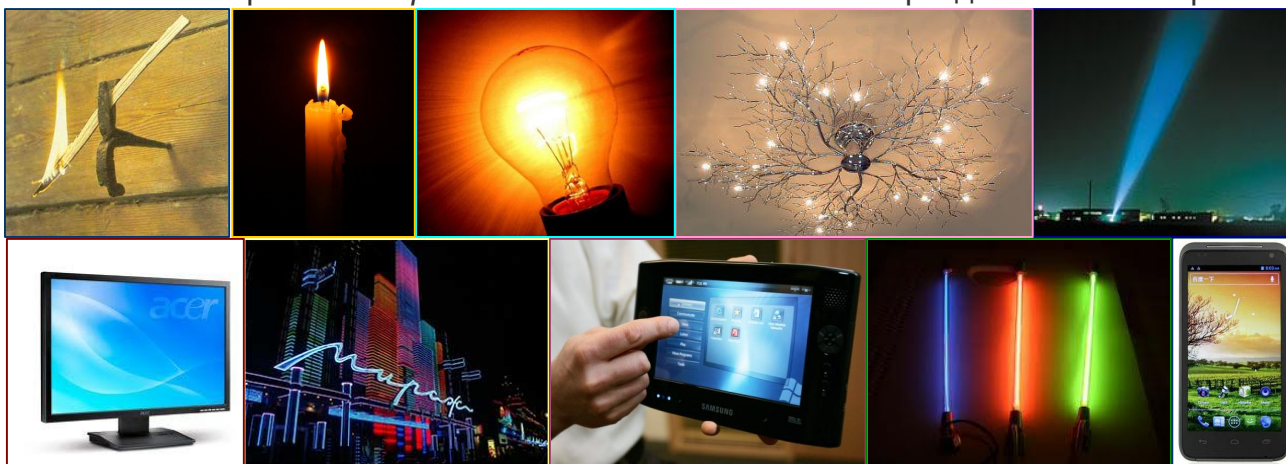


Рис. 3. Искусственные источники: лучина, свеча, лампы накаливания, дуговые прожекторы, экран телевизора, светящаяся реклама, экран приёмника, газоразрядные лампы, экран мобильного телефона.

(тепловые) и «холодные». Среди тех и других есть источники естественные и искусственные.

К тепловым источникам относятся солнце и практически все осветительные приборы прошлого. В том числе лампочки накаливания. Они излучают как видимый свет, так и тепло. Причём тепла обычно гораздо больше – обычно более 90%. В этом смысле они **неэкономичны**.

Источники «холодного света» излучают в видимом диапазоне значительно больше энергии в процентном отношении. В этом смысле их можно считать **экономичными**.

Среди естественных источников «холодного света», известны многочисленные живые объекты, вырабатывающие в результате своей жизнедеятельности вещества, вступающие в химическую реакцию с кислородом, и при этом испускающие свет. Так у одноклеточных организмов свет создаётся в особых органоидах, у бактерий — в цитоплазме, а у более высокоразвитых существ (например, рыбах) – в специальных светящихся органах. Такое свечение называется **биолюминесценцией** («люмен» в переводе с латыни означает «свет»).

Впервые подобное свечение было обнаружено и описано Христофором Колумбом в 1492. Моряки тут же приписали этому явлению сверхъестественное объяснение, из которого следовало, что источником свечения является огонь из преисподней.

Первое научное объяснение биолюминесценции было дано только спустя 100 лет, в 1668 году, когда физик Роберт Бойль доказал, что «холодное свечение» — результат химических реакций, катализатором в которых выступает кислород. Он провел эксперимент со светящейся гнилушкой, помещенной под стеклянный купол, подсоединенный к вакуумному насосу. Когда физик откачивал воздух, свечение затухало. Вот так, при помощи простейшего эксперимента была разгадана загадка, пугавшая человечество в течение более сотни лет.

Костер, лучина, фитильные и газовые светильники, наконец, электрическая лампочка – таков долгий путь развития искусственных источников света.

В пламени костра, лучины и фитильных ламп свет излучается раскаленными твердыми частичками углерода (температура $\approx 1000^{\circ}\text{C}$). В электрических лампах накаливания светится раскаленная металлическая нить (температура $\approx 3000^{\circ}\text{C}$). Таким образом, до наших дней человечество в основном пользуется горячими источниками света.

Уже в наше время были созданы и продолжают разрабатываться искусственные источники «холодного света». Это лампы дневного света, люминесцентные

осветительные и рекламные трубки, экраны телевизора, мобильного телефона, рис.3..

4⁰. Любой объект становится видимым одним из двух способов:

- объект сам может быть источником света, как, например, электрическая лампа, свеча или звезда, и мы видим свет, непосредственно испускаемый этим источником;
- чаще же видимый объект отражает, падающий на него свет (первичным источником света в этом случае может быть солнце, лампа или ещё что-нибудь); такой объект можно рассматривать как вторичный источник света.

Примером видимого объекта, который отражает солнечный свет, является Луна.

При отсутствии света – *в полной темноте глаз ничего увидеть не может.*

5⁰. На практике все источники света имеют размеры. Но при изучении световых явлений часто разумно пользоваться понятием **точечный источник света** («светящаяся точка»).

Если размеры источника света малы по сравнению с расстояниями, на котором мы оцениваем его действие, и излучение света происходит равномерно во все стороны, источник его называют **точечным источником**.

Громадные звезды, во много раз превосходящие Солнце, воспринимаются нами как точечные источники света, так как находятся на колоссальном расстоянии от Земли.

Вспомните аналогичные весьма полезные понятия: «материальная точка», «точечный заряд».

6⁰. Еще одно очень важное понятие, которым мы будем постоянно пользоваться в этом разделе, — **световой луч**, рис. 4.

Световой луч — это линия, вдоль которой распространяется энергия от источника света.



Рис. 4. Так выглядят лучи света между деревьями, луч от фонаря, световые лучи маяка, световые лучи из малых отверстий. На оптических схемах лучи света изображаются **условно** в виде линий (см. ниже).

Основная польза от введения понятия светового луча заключается в том, что поведение лучей в пространстве определяется простыми законами — законами геометрической (лучевой) оптики.

7⁰. **Прямолинейное распространение света** — факт, установленный в глубокой древности. Об этом писал еще основатель геометрии Евклид (300 лет до нашей эры). Геометрические понятия «луч», «прямая» возникли в результате наблюдений за распространением света.

Древние египтяне использовали закон прямолинейного распространения света для установления колонн по прямой линии. Колонны располагались так, чтобы из-за ближайшей к глазу колонны не были видны все остальные, рис. 5.

Если между глазом и каким-нибудь источником света поместить непрозрачный предмет **К**, то источник света мы не увидим, рис. 6. Объясняется это тем, что **в однородной среде свет** (в отличие, например, от звука) **распространяется прямолинейно**.

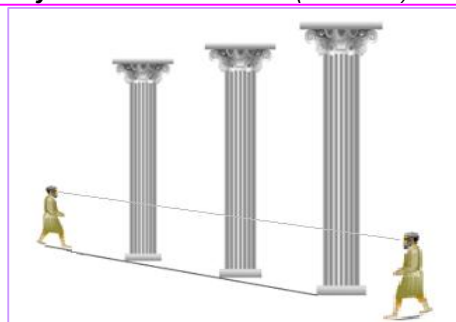


Рис. 5. Колонны располагались так, чтобы из-за ближайшей к глазу колонны не были видны все остальные

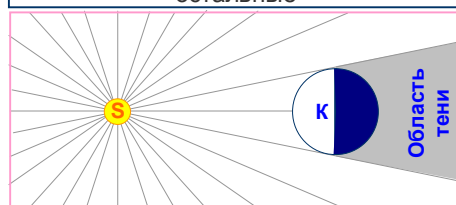


Рис. 6. Образование тени: из области за телом источник света невидим.

Тень — это область пространства, в которую не попадает свет от источника.

8⁰. **Прямолинейность распространения света в однородной среде** объясняет образование **тени** и **полутени**. Тени людей, деревьев, зданий и других предметов хорошо наблюдаются на Земле в солнечный день.

На *рис. 7*, слева показана тень, полученная на экране при освещении точечным источником света **S** (например, карманным фонариком) непрозрачного шара **AD**.

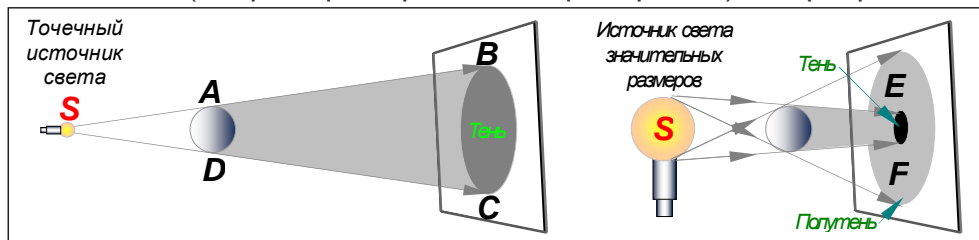


Рис. 7. Тень от тела образуется благодаря прямолинейности распространения света. Тень тела, освещаемого точечным источником света, имеет чёткие границы. Полутень дают непараллельные лучи источника больших размеров

Поскольку шар непрозрачен, то он не пропускает свет, падающий на него. В результате на экране образуется **тень BC**.

Если провести прямую через точки **S** и **A**, то на ней будет лежать и точка **B**. Прямая **SB** является лучом света, который касается шара в точке **A**. Если бы свет распространялся не прямолинейно, то тень могла бы не образоваться. Такую четкую тень мы получили потому, что расстояние между источником света и экраном намного больше, чем размеры лампочки.

Если взять большую лампу, размеры которой сравнимы с расстоянием до экрана (*рис. 7*, справа), вокруг тени на экране образуется частично освещенное пространство — **полутень**. Это область **EF**. В данном случае источник света состоит из множества точек и каждая из них испускает лучи. Поэтому на экране имеются области, в которые свет от одних точек попадает, а от других нет. Там и образуется **полутень**. Часть поверхности экрана (центральная область) окажется совершенно неосвещенной. Здесь наблюдается **полная тень**. Этот опыт также подтверждает прямолинейное распространение света.

Полутень — это область, в которую попадает свет от части источника света.

9⁰. Образованием тени и полутени при падении света на непрозрачный предмет объясняются **затмения Луны и Солнца**, *рис. 8-9*.

При движении вокруг Земли Луна может оказаться между Землей и Солнцем или Земля — между Луной и Солнцем. В этих случаях наблюдаются солнечные или лунные затмения.

При **лунном затмении** Луна входит в конус тени за Землей, *рис. 8*.

Когда Луна во время затмения полностью входит в тень Земли, говорят о **полном затмении Луны**, когда частично — о **частном затмении Луны**.

Во время затмения (даже полного) Луна не исчезает полностью, а становится тёмно-красной, *рис. 10*. Этот факт объясняется тем, что Луна даже в фазе полного затмения продолжает освещаться. Солнечные лучи, проходящие по касательной к земной поверхности, рассеиваются в атмосфере Земли и за счёт этого рассеяния частично достигают Луны. Поскольку земная атмосфера наиболее прозрачна для лучей красно-оранжевой части спектра. Поэтому эти лучи в большей мере достигают поверхности Луны при затмении, что и объясняет окраску лунного диска.

При **солнечном затмении** тень от Луны падает на Землю, *рис. 9*.

Солнечное затмение дает возможность наблюдать внешнюю часть атмосферы Солнца — **солнечную корону**. В обычных условиях солнечная корона не видна из-за ослепительного блеска поверхности Солнца, *рис. 11*.

В тех местах Земли, куда упала лунная тень, наблюдается *полное затмение Солнца*, в местах полутени только часть Солнца будет закрыта Луной, т. е. будет наблюдаться *частное затмение Солнца*.

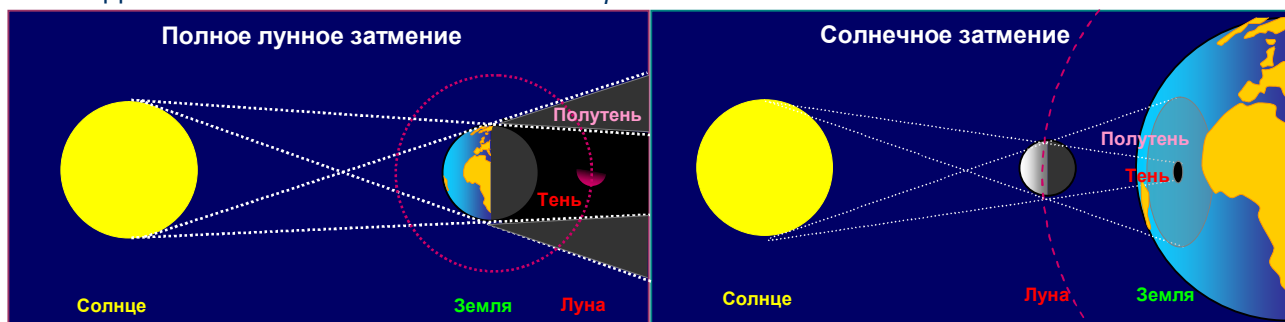


Рис. 8. *Лунное затмение* наступает, когда Луна входит в конус тени Земли. Лунное затмение может быть **полным** (как на рисунке) или **частичным** (когда Луна, двигаясь по орбите, выйдет из тени).

Рис. 9. *Солнечное затмение*. Куда упала тень, наблюдается **полное затмение**, в местах полутени наблюдается **частное затмение**. В остальных местах затмения не наблюдается.

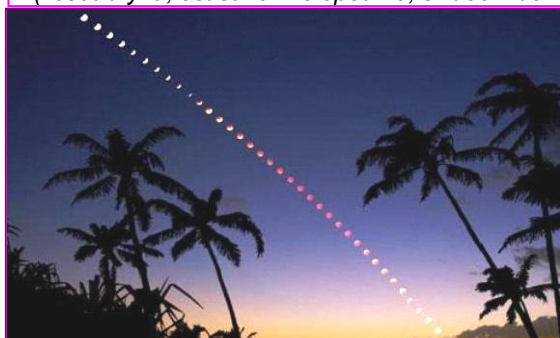


Рис. 10. Так выглядит весь цикл Лунного затмения (стробоскопический снимок).

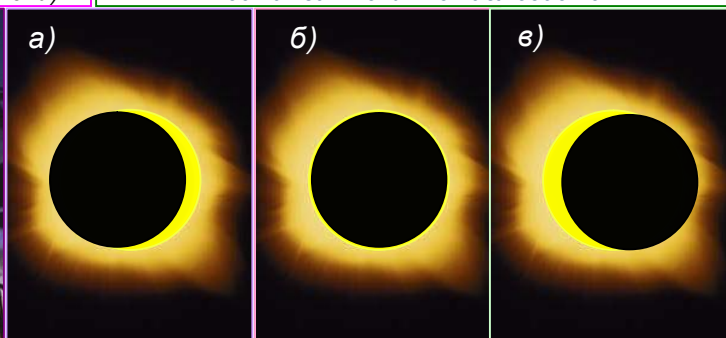


Рис. 11. Солнечная корона выглядит по-разному для наблюдателей с Земли из тени (б) и полутени (а, в).

В остальных местах на Земле затмения Солнца наблюдаться не будут.

11⁰. Учёные давно научились делать расчёты и составлять таблицы, в которых с высокой точностью указывается время лунных и солнечных затмений. В основе этих расчётов лежит (кроме законов механики Ньютона) **закон прямолинейного распространения света**, что является доказательством его справедливости.

Итак, рассмотренные в этом параграфе факты показывают, что

свет в оптически однородной среде распространяется прямолинейно.

Обратите внимание на то, что в законе оговаривается условие: среда, в которой распространяется свет, должна быть **однородной** – т. е. иметь одинаковые оптические свойства во всех своих точках.

О том, как распространяется свет при переходе из одной среды в другую, вы узнаете чуть позже.

12⁰. Ещё одна особенность распространения пучков световых лучей состоит в том, что, пересекаясь, они не взаимодействуют, и после пересечения распространяются независимо друг на друга, рис. 12.



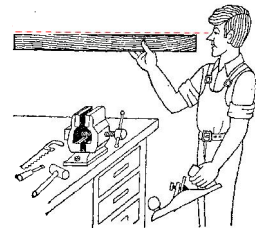
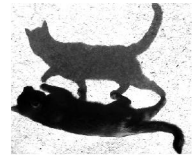
Рис. 12. **Независимость распространения света**: пучки световых лучей, пересекаясь, не взаимодействуют и распространяются после пересечения независимо друг от друга.

Обычно это свойство называют **законом независимости распространения световых лучей**.



Вопросы

1. Что такое оптика? Что такое свет? Что такое линейная оптика?
2. Что такое световой луч?
3. Что такое источник света? Какие источники света вам известны?
4. Почему источники холодного света более экономичны?
5. Что такое точечный источник света?
6. При каких условиях тот или иной объект становится видимым?
7. Что такое тень и полутень? В каких случаях они существуют?
8. Что такое лунное затмение? Как в это время выглядит Луна? Почему?
9. Что такое солнечное затмение? Что такое солнечная корона?
10. Сформулируйте закон прямолинейного распространения света? Какие явления доказывают его справедливость?
11. Что такое закон независимости распространения световых лучей?



Упражнение

1. Какие источники света изображены на рис. 2÷3?
2. На рис. 13 изображена схема опыта по получению тени от двух источников света. Источник S_1 – маленькая лампочка синего цвета, источник S_2 – красного. Перечертите схему в тетрадь и раскрасьте рисунок. Объясните, почему опыт доказывает прямолинейность распространения света.
3. Во время солнечного затмения на Землю от Луны падает тень и полутень, рис. 9. Видит ли Солнце человек, находящийся в области тени? В области полутени? Ответ обоснуйте.

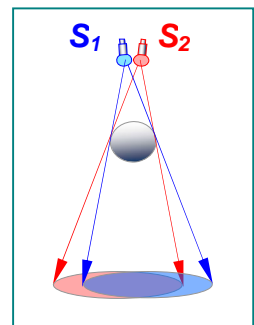


Рис. 13. Тень от двух источников



Задание

В куске картона сделайте отверстие диаметром 3÷5 мм. Расположите картон с отверстием на расстоянии около 10 см от стены, находящейся против хорошо освещенного солнечным светом окна. На стене вы увидите перевернутое и уменьшенное изображение окна. Объясните наблюдаемое явление.

Почему изображение оказывается перевернутым?

Камера-обскура (лат. *camera* = “комната”, *obscura* = “темная”) — простейшее устройство, позволяющее получать оптические изображения объектов. Камера представляет собой светонепроницаемый ящик с отверстием в одной из стенок и экраном на противоположной стенке.

Этот прибор был известен задолго до изобретения фотографии. Ещё Леонардо да Винчи описал ее в своем «Трактате о живописи». С его помощью, не имея художественных навыков, можно точно зарисовывать неподвижные объекты. В девятнадцатом же веке с изобретением светочувствительных материалов камера-обскура послужила основой для первых фотоаппаратов. Старинные фотографии — **дагерротипы** получали именно таким способом: с помощью камеры-обскуры, без каких-либо объективов.



§ 63. ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА. ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА

1⁰. Сам по себе свет увидеть нельзя, но можно увидеть явления взаимодействия его с предметами. В данном параграфе вы познакомитесь с явлениями отражения света от различных объектов и законами отражения.



Рис. 14. Примеры отражения. а) отражение в зеркале. б) отражение в спокойной воде. в) отражение в беспокойной воде и влажном воздухе. г) отражение ночью.

На рис. 14 показаны различные случаи отражения. Они отличаются друг от друга. Вероятно, наиболее знакомы вам отражения в зеркале и в спокойной воде. При волнении воды в ней можно различить только световые пятна или световую дорожку. Лучи света в облаках – это рассеянное отражение света от тумана. Луну мы видим, потому что она отражает свет Солнца. Ночной пейзаж отражает отражённый свет Луны. А вот в пространстве между Луной и предметами на Земле мы ничего не видим, хотя свет проходит сквозь него около 380 000 км. Там свет практически ни с чем *не взаимодействует* – он не излучается, не поглощается, не отражается и не преломляется.

Световой луч прожектора маяка видно, когда он распространяется в не вполне прозрачном воздухе или падает на какой-либо предмет. Солнечные лучи хорошо видны, если они попадают в задымлённое помещение через малые отверстия. В достаточно прозрачном воздухе солнечных лучей не видно.

2⁰. Таким образом, возможность видеть несветящиеся предметы связана с тем, что всякое тело частично отражает, а частично пропускает или поглощает падающий на него свет.

Хорошей отражательной способностью обладает зеркало (оно способно отражать до 90% световой энергии). И вы не раз, наверное, замечали это, направляя в разные стороны яркий солнечный зайчик.

Отражение света подчиняется определенному закону. Закон отражения, как и закон прямолинейного распространения света, был открыт древнегреческим ученым Евклидом в III в. до н.э.

Для установления этого закона воспользуемся оптическим диском – угломером с источником направленного луча света, рис. 15. Источником света в данном случае является маленькая лампочка, находящаяся внутри подвижного осветителя 1. Свет лампочки, выходя из осветителя через узкую щель, распространяется по поверхности диска и, будучи рассеянным ее частицами, образует на ней освещенную полосу. Эту полосу мы будем принимать за «луч света».

Поместим в центр диска зеркало 2 и направим на него световой пучок (падающий луч) АО. Свет отразится от зеркала, и на поверхности диска появится отраженный луч ОВ. Его появление свидетельствует о том, что он лежит в той же плоскости, что и луч АО с перпендикуляром ОС (эту плоскость называют **плоскостью падения** луча).



Рис. 15. Оптический диск.

При этом угол COB , образуемый отраженным лучом OB с перпендикуляром OC , равен углу COA , образуемому с тем же перпендикуляром падающим лучом AO .

Угол между перпендикуляром к отражающей поверхности в точке падения луча и падающим лучом называется **углом падения** луча, а угол между этим перпендикуляром и отраженным лучом называется **углом отражения** луча.

Передвинув источник света вдоль края диска, и изменив тем самым угол падения луча, мы увидим, что угол отражения при этом тоже изменится, но так, что эти два угла по-прежнему будут равны.

Проведенный опыт позволяет сделать следующий важный вывод: **луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр, проведенный в точке отражения к отражающей поверхности, лежат одной плоскости, причем угол падения луча равен углу его отражения.**

3°. Угол падения будем обозначать буквой α , а угол отражения β (рис. 16). Поэтому математически закон отражения света в той части, которая касается этих углов, можно выразить в виде следующего равенства:

$$\angle\alpha = \angle\beta. \quad [1]$$

Заметим, что если луч света в опыте, показанном на рис. 15, будет падать на зеркало по направлению BO , то после отражения он пойдет по направлению OA . Другими словами, **луч, идущий по пути отраженного луча, отражается затем по пути падающего.** Это свойство называют **обратимостью световых лучей**, рис. 16.

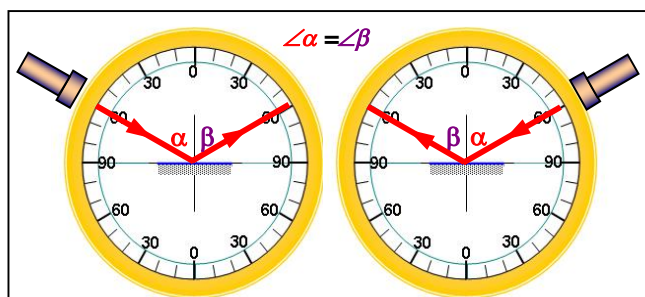


Рис. 16. Отражение светового луча (опыт). Углы падения и отражения равны; падающий и отраженный лучи в одной плоскости; лучи обратимы.

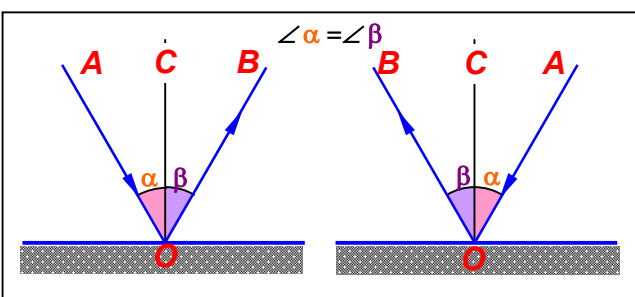


Рис. 17. Отражение светового луча (схема). Углы падения и отражения равны; падающий и отраженный лучи в одной плоскости; лучи обратимы.

Итак, отражение света происходит по следующим законам, рис. 16÷17:

1. **Луч падения, луч отражения и перпендикуляр к границе раздела двух сред, поставленный в точку падения луча, лежат в одной плоскости.**
2. **Угол падения равен углу отражения: $\angle\alpha = \angle\beta$.**
3. **Падающий и отраженный лучи могут меняться местами, т. е. они обратимы.**

4°. Сформулированные законы отражения света справедливы для зеркальной поверхности – отполированной плоскости металлов, стекла и т. п., рис. 18, а.



Рис. 18. Отражение в стекле (а); отражение в почти спокойной воде (б); отражение в воде с небольшими волнами (в). Чем они отличаются? Видно ли само стекло, воду? Почему?

При этом падающий на тело пучок световых лучей отражается в одном направлении, *рис. 19, а; рис. 20, а*. Такое отражение лучей называют **зеркальным**.

Однако поверхности, которые можно считать зеркальными, встречаются достаточно редко.

Обычно поверхности тел имеют неровности, размеры которых значительно больше длины волны отражаемого света. В этих случаях четких изображений

отраженных предметов не получается, так как отражённые лучи направлены случайным образом в разные стороны. Законы отражения на каждом маленьком участке поверхности

выполняются и в этом случае, *рис. 18, б, в; рис. 19, б; рис. 20, б*. Такое отражение называют **диффузным** или **рассеянным**.

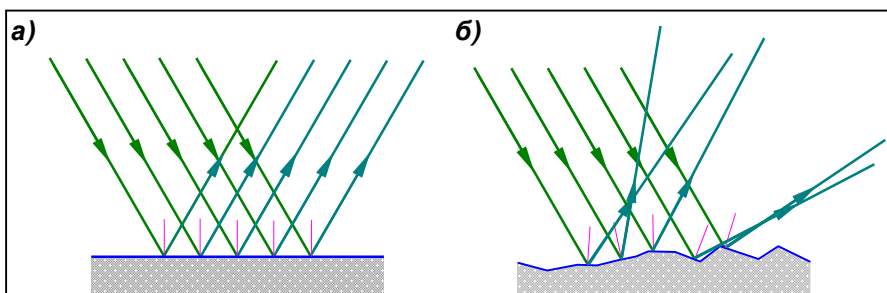


Рис. 19. Зеркальное (а) и диффузное (б) отражение световых лучей (схема).

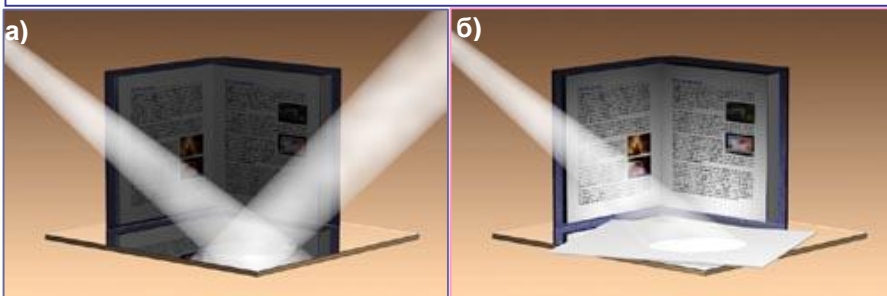


Рис. 20. Зеркальное (а) и диффузное (б) отражение.

Луч света, падающий на зеркало, практически полностью отражается: текст книги нельзя прочесть из-за слабого освещения. Если на зеркало положить бумагу, пучок света отражается ею во всех направлениях – рассеивается, освещая книгу. Текст книги становится видимым, особенно в нижней части, книга освещается сильнее.

Зеркальное отражение возникает на очень гладких, полированных поверхностях. Если же поверхность шероховата, она обязательно рассеивает свет. Это и происходит, когда зеркало накрыто бумагой.

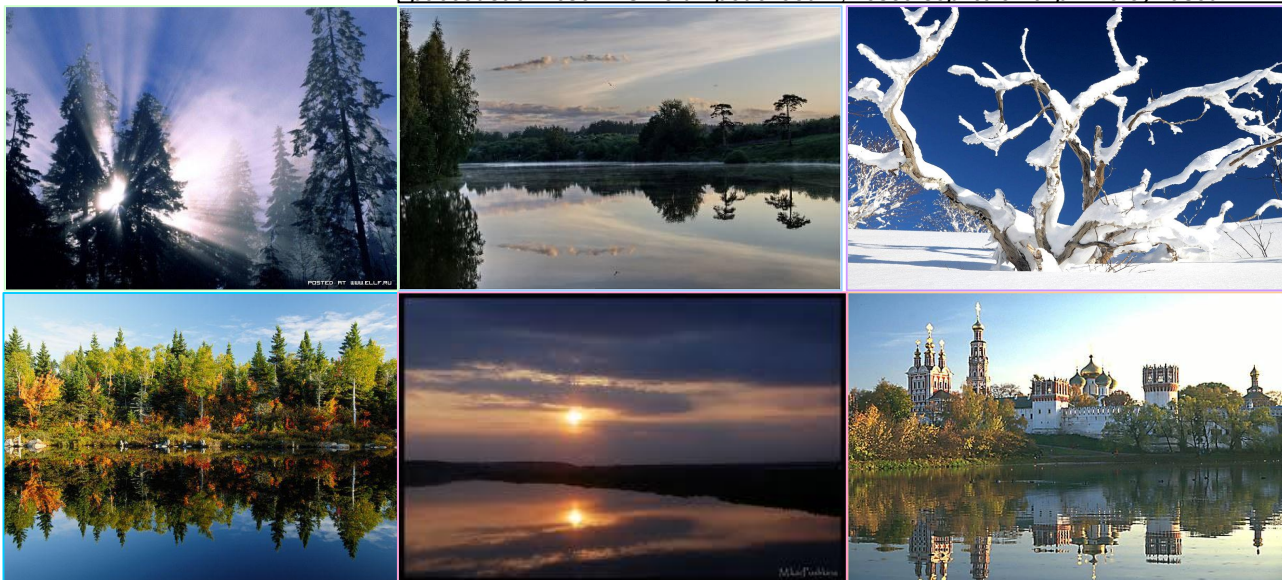


Рис. 21. Какие особенности отражения световых лучей вы можете заметить на этих фотографиях?

Благодаря рассеиванию света мы видим большинство окружающих предметов. Диффузно отражает свет, например, снег или обычный лист белой бумаги. Чистое зеркало само по себе невидимо — глядя на него, мы видим только предметы, которое оно отражает. Не видна также гладкая поверхность чистой воды. Глядя на спокойное море или озеро, мы видим либо дно (то есть преломленные лучи, отраженные от дна), либо небо и облака (зеркально отраженные лучи). Это иллюстрируют приведенные выше рисунки.

Все несветящиеся тела, освещаемые каким-нибудь источником, становятся видимыми благодаря рассеиваемому ими свету. Хорошо отшлифованную поверхность стекла, поверхность спокойной воды трудно увидеть потому, что такие поверхности рассеивают очень мало света. Мы видим в них чёткие изображения окружающих освещенных предметов. Однако стоит только поверхности зеркала покрыться пылью, а поверхности воды зарыбить, как они становятся хорошо видимыми.



Вопросы

1. Можно ли видеть свет? Каким образом удастся сделать видимыми лазерные лучи во время эстрадных представлений на сцене?
2. Что такое плоскость падения луча?
3. Какой угол называют углом падения? углом отражения?
4. Чему равен угол падения, если луч падает на зеркало перпендикулярно к его поверхности?
5. Сформулируйте закон отражения света. Кем и когда он был открыт?
6. Что такое зеркальное и диффузное отражение? Можно ли увидеть чистое зеркало?



Упражнения

1. Перенесите *рис. 22* в тетрадь, постройте для каждого случая падающий или отраженный луч. Обозначьте углы падения и отражения.
2. На зеркало падает пучок света от лазерной указки, расположенной перпендикулярно к поверхности зеркала. Чему равен угол отражения этого пучка?
3. Определите угол отражения, если угол падения равен 30° .
4. Угол между падающим и отраженным лучами составляет 80° . Чему равен угол падения луча?
5. Солнечный луч отражается от поверхности озера. Угол между падающим лучом и горизонтом вдвое больше, чем угол между падающим и отраженным лучами. Чему равен угол падения луча?
6. Высота Солнца такова, что его лучи составляют с горизонтом угол 40° . Сделайте чертёж (*рис. 22, справа внизу*) и покажите на нем, как нужно расположить зеркало АВ, чтобы «зайчик» попал на дно колодца.

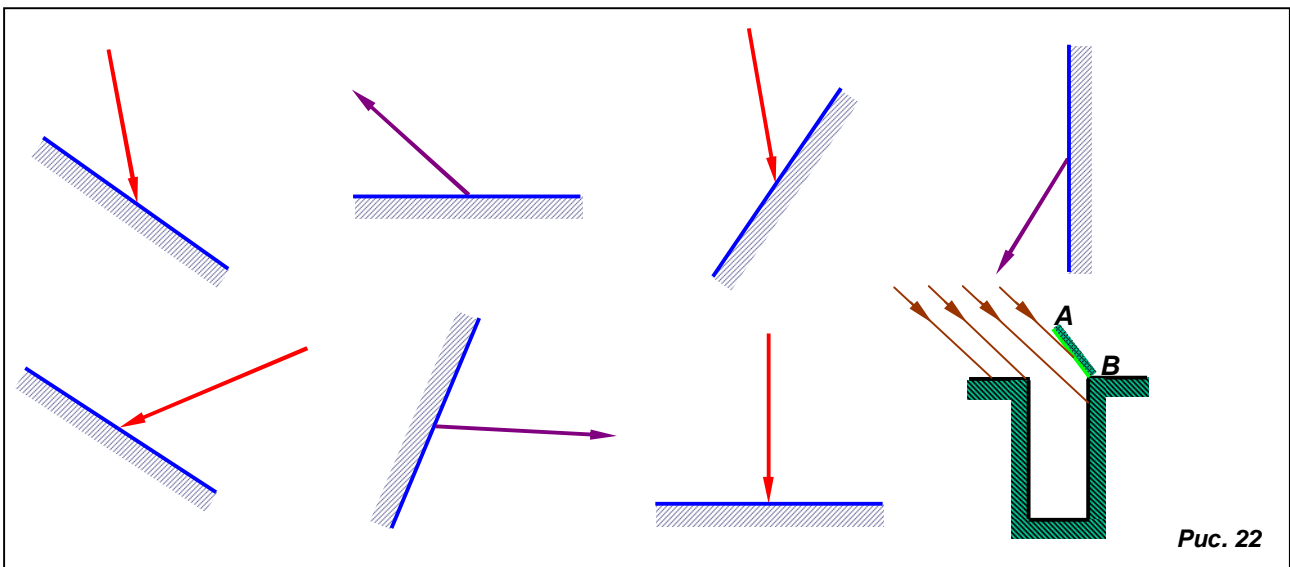


Рис. 22

§ 64. ЗЕРКАЛА ПЛОСКИЕ, ВОГНУТЫЕ И ВЫПУКЛЫЕ

1⁰. Зеркало, поверхность которого представляет собой плоскость, называют **плоским зеркалом**.

Когда предмет находится перед плоским зеркалом, кажется, что такой же предмет находится за зеркалом, то есть там, где предмета на самом деле нет. Плоское зеркало создаёт **кажущееся** изображение. Кроме того, смотрясь в зеркало, вы видите в нём отражение себя и находящихся рядом предметов.

Выясним, как это получается.

Из светящейся точки S падают на зеркало MN расходящиеся лучи SO_1 и SO_2 , рис. 23. Отражённые зеркалом, они, останутся расходящимися и попадут в глаз, расположенный как показано на рисунке, как будто бы из точки S^* . Эта точка является точкой пересечения отражённых лучей, *продолженных* за зеркало. Она видна только в некоторой **области видения**, рис. 23*.

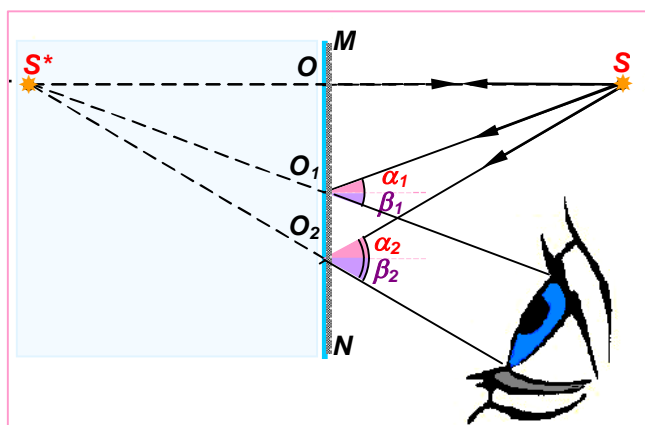


Рис. 23. Построение зеркального (мнимого) изображения S^* источника S . При этом $SO=S^*O$.

Рис. 24. Мнимое изображение находится на таком же расстоянии от зеркала, как и сам предмет.

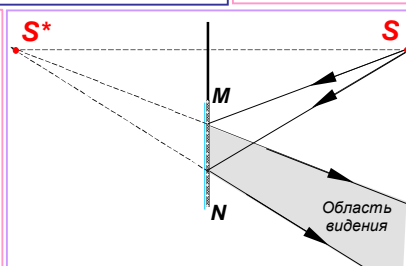
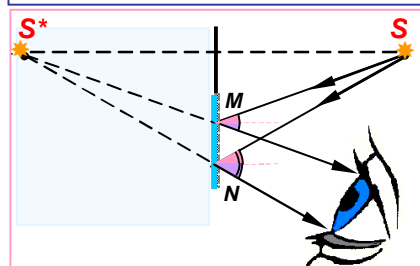


Рис.23*. Изображение S^* существует независимо от размера зеркала и наличия источника непосредственно над зеркалом. Лишь бы отражённые от зеркала лучи попадали в глаз. Тогда мы увидим изображение источника S . От расстояния источника и размеров зеркала зависит **область видения** изображения источника S . Она выделена серым фоном и задается краями M и N зеркала MN .

Рис. 25. У предмета и его изображения в зеркале правое и левое меняются местами. Мальчик поднял левую руку, а у его изображения в зеркале поднята – правая рука.

Изображение S^* называется **мнимым**, так как получается в результате пересечения не реальных лучей света, которых за зеркалом нет, а их воображаемых продолжений. Мы не можем к нему прикоснуться, поместить за зеркалом экран или фотопластинку. Если бы это изображение было получено как точка пересечения реальных световых лучей, оно называлось бы **действительным**.

2⁰. Чтобы понять, как располагаются источник света и его мнимое изображение относительно зеркала, укрепим кусок плоского стекла в вертикальном положении, рис. 24. Поставив перед стеклом горящую свечу, мы увидим в стекле, как в зеркале, её изображение. Оно будет казаться расположенным позади стекла. Однако, заглянув за стекло, мы не увидим никакой свечи, так как изображение в стекле является **мнимым**.

Вместо зеркала мы использовали стекло, чтобы одновременно видеть мнимое отражение свечи и реальные предметы за стеклом. Воспользуемся этим и подсунем под стекло линейку. Измерим ей расстояния от стекла до свечи и от стекла до изображения, а затем размеры свечи и её изображения. Они окажутся попарно равными, но *не одинаковыми*. У предмета и его изображение в плоском зеркале *правое и левое меняются местами*, рис. 25. Это означает, что **предмет и его изображение в плоском зеркале зеркально симметричны**.

С зеркальной симметрией подробнее можно ознакомиться в «Дополнении для любознательных» в конце Пособия для 7 класса.

Таким образом, изображение предмета в плоском зеркале мнимое (воображаемое); прямое (неперевернутое); одинаковое по размерам с предметом; расположено на таком же расстоянии от зеркала, что и сам предмет; зеркально симметричное относительно предмета, рис. 26.

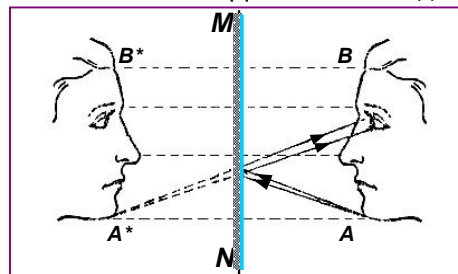


Рис. 26. Построение мнимого изображения лица в плоском зеркале.

3⁰. Отражающие поверхности не обязательно должны быть плоскими. Используются вогнутые и выпуклые зеркала. В этом случае в разных точках поверхности зеркала перпендикуляр имеет различные направления. Закон отражения справедлив и для искривлённых поверхностей, но для построения изображения необходимо ввести дополнительные понятия и определения.

Рассмотрим подробнее **сферические зеркала**.

Сферическое зеркало – это тщательно отполированная часть поверхности шара, рис. 27. Центр этого шара C называется **оптическим центром** (центром кривизны) зеркала, а вершина шарового сегмента O – **полюсом** зеркала. Любая прямая, проходящая через оптический центр называется **оптической осью**. Оптическая ось OC , проходящая через центр C и полюс O , называется **главной оптической осью**. Угол α , образованной двумя радиусами, лежащими в одной плоскости с осью, называется **апертурой**.

Лучи, идущие вблизи главной оптической оси, называются **осевыми** или **центральными** лучами. Все наши выводы будут относиться именно к таким лучам.

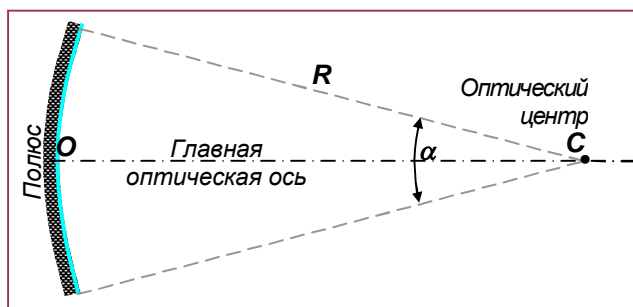


Рис. 27. Вогнутое сферическое зеркало. R – радиус кривизны поверхности зеркала; α – апертура.

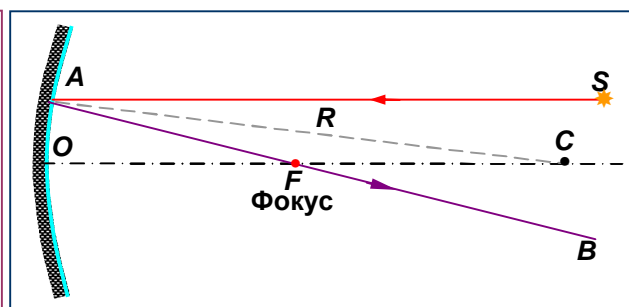


Рис. 28. Вогнутое сферическое зеркало. К понятию фокуса вогнутого зеркала – места сбора лучей.

4⁰. Если на **вогнутое** зеркало пустить пучок лучей, параллельных главной оптической оси OC , лучи эти, отразившись от зеркала, сойдутся вблизи точки на оси OC у середины радиуса R . Эта точка называется **фокусом сферического зеркала**. Она обозначается буквой F , рис. 28, 29.

Фокус зеркала F лежит на оптической оси, посередине между оптическим центром C и полюсом O зеркала.

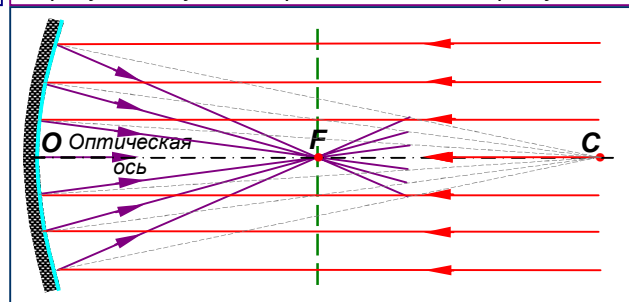


Рис. 29. Пучок центральных лучей, падающих параллельно главной оси OC , собирается в фокусе.

Плоскость, проходящая через фокус F перпендикулярно главной оптической оси, называется **фокальной плоскостью**.

В фокусе F на фокальной плоскости собирается после отражения от зеркала **центральный** пучок лучей, падающих на вогнутое зеркало параллельно главной оптической оси зеркала, *рис. 29*.

Если в фокусе расположен точечный источник света, создающий расходящийся пучок, то после отражения возникает почти параллельный пучок (это следует из обратимости хода лучей).

По этой причине *вогнутые зеркала называются собирающими* зеркалами.

Точка F , в которой центральный луч, параллельный главной оптической оси зеркала, после отражения пересекает эту ось зеркала, называется **фокусом** зеркала.
 Расстояние OF от вершины зеркала до фокуса называется **фокусным расстоянием**. Его будем обозначать буквой f ($OF=f$).

Примечание: чтобы точно в фокусе собирались не только *центральные*, но и *удалённые* от оси OC лучи, следует применять **параболические** зеркала.

5°. С **выпуклым сферическим** зеркалом всё обстоит аналогичным образом, но фокус F в этом случае находится за зеркалом. Лучи, падающие на выпуклое зеркало

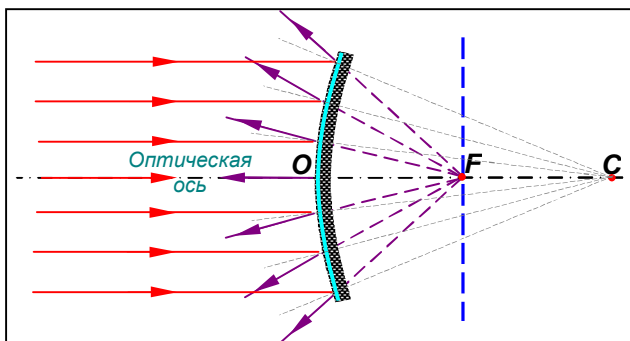


Рис. 30. Лучи, падающие параллельно оси OC отражаются, как если бы они излучались в фокусе.

параллельно оптической оси, отражаются так, как если бы они излучались в фокусе, *рис. 30*. Выпуклые зеркала после отражения дают более широкий световой пучок.

6°. Для построения изображения в **сферическом зеркале** (вогнутом или выпуклом) необходимо воспользоваться общим законом отражения и, по меньшей мере, двумя из следующих трёх лучей, *рис. 31*:

- луч 1, идущий параллельно оптической оси OC , отражается через фокус;
- луч 2, направленный к центру зеркала O , отражается под таким же углом к оптической оси;
- луч 3, идущий через центр кривизны C , отражается назад, в самого себя.

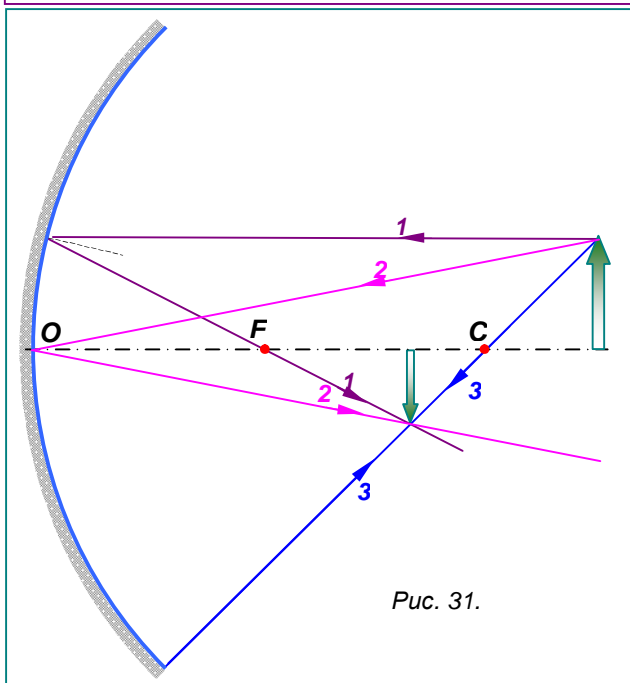


Рис. 31.

7°. В **вогнутом зеркале** в примере на *рис. 31* (здесь предмет находится на расстоянии от зеркала, большем, чем OC) изображение оказывается **действительным и перевёрнутым**.

Мнимое прямое изображение в вогнутом зеркале получается, если предмет находится между фокусом и зеркалом (на участке OF). В остальных случаях, как и на *рис. 31*, изображение в вогнутом зеркале **действительное перевёрнутое**.

8°. Построение изображения точки S и предмета AB в **выпуклом** зеркале показано на *рис. 32, 33*.

Где бы точка S или предмет AB ни находились относительно выпуклого зеркала, их изображения (S^* или A^*B^*) в **выпуклом** зеркале всегда **мнимые и уменьшенные**. Это свойство выпуклого зеркала на практике оказалось полезным.

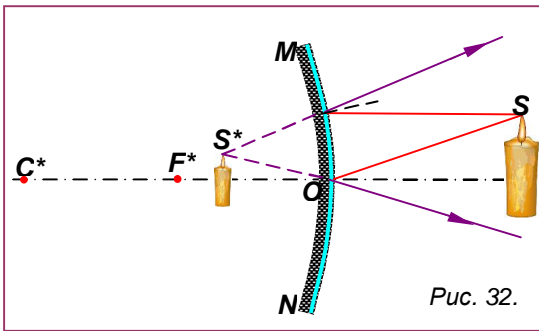


Рис. 32.

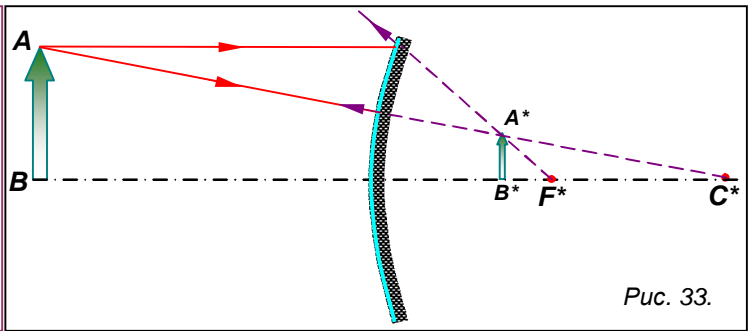


Рис. 33.

9⁰. **Применение зеркал.** Первые зеркала, по-видимому, были **плоскими** и создавались для того, чтобы следить за собственной внешностью. Они изготавливались из бронзы и серебра и, конечно, были очень дорогими. Как только появилась возможность создания доступных по стоимости больших зеркал, они стали использоваться в дизайне интерьеров. Такая традиция возникла ещё в средние века.



Плоское зеркало было использовано для усовершенствования камер-обскура, а затем использовалось в зеркальных фотоаппаратах.

Получение изображения с помощью плоского зеркала используется в перископе (от греч. «перископео» — смотрю вокруг, осматриваю) — оптическом приборе, служащем для наблюдений из танков, подводных лодок, различных укрытий. Миниатюрные зеркала используются в зеркальных гальванометрах, крутильных весах и других наиболее чувствительных приборах, *рис. 34.*

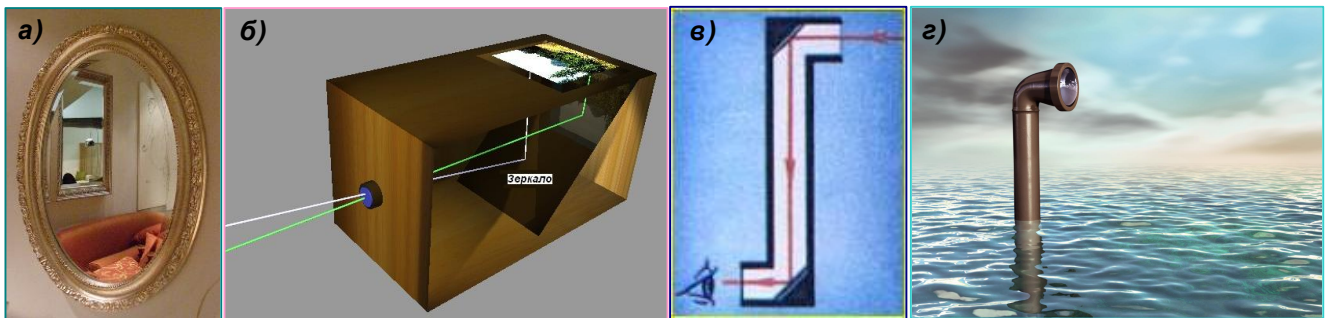


Рис. 34. Плоские зеркала: а) в интерьере комнаты; б) в усовершенствованной камере - обскура для рисования изображение плоского зеркала позволило получить не перевёрнутое изображение; в) схема перископа; г) перископ на подводной лодке.

На картинке д) показано устройство зеркального гальванометра (провода, подводящие ток к источнику светового луча и к рамке прибора не показаны). Световой луч направляется на зеркало, связанное с рамкой, так что малейший её поворот приводит к заметному перемещению светового зайчика по шкале прибора.

Калейдоскоп – одна из самых любимых игрушек детей. Это оптический прибор, чаще всего в виде трубки, содержащей внутри три плоских продольных зеркальных стекла, сложенных в виде трёхгранной призмы. При поворачивании трубки вокруг продольной оси цветные элементы (обычно разноцветные осколки стекла), находящиеся между зеркалами пересыпаясь, отражаются и создают постоянно меняющиеся симметричные узоры, *рис. 35.*

Калейдоскоп был известен ещё в Древней Греции.



Рис. 35. Плоские зеркала, сложенные в трёхгранную зеркальную призму используются в калейдоскопе – приборе, способном создавать неповторяющиеся симметричные узоры. Внешний вид и устройство.

Вогнутые зеркала (обычно параболические) находят широкое применение в науке и технике. Например, ими пользуются в тех случаях, когда нужно направить в какое-либо место концентрированный пучок света или получить пучок параллельных лучей от точечного источника. Так устраиваются осветители в автомобильных, проекционных и карманных фонарях. В каждом из них за источником света помещается вогнутое зеркало. Параболические зеркала используют для фокусировки солнечного излучения, *рис. 36*.

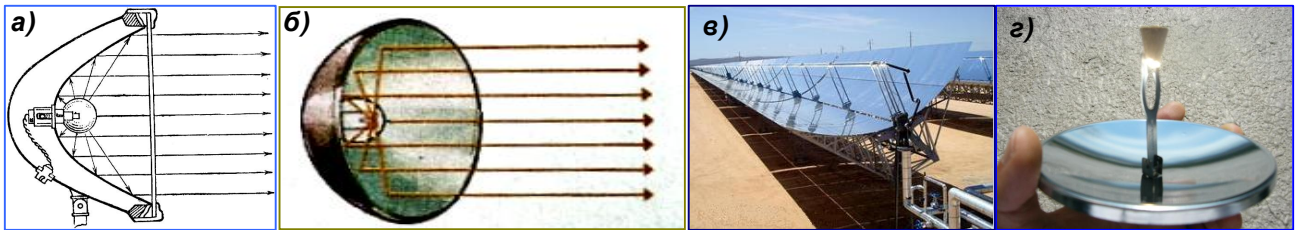


Рис. 36. а) схема устройства автомобильной фары; б) отражатель карманного фонарика; в) параболические отражатели солнечной электростанции; г) солнечная зажигалка с маленьким вогнутым зеркалом.

Вогнутые зеркала находят чрезвычайно важное применение при устройстве прожекторов. Прожектор состоит из двух главных частей: мощного источника света (электрической дуги) и большого вогнутого зеркала, помещаемого сзади источника света так, чтобы источник света оказался в фокусе зеркала.

Прожектор как осветитель применяется при киносъёмках, при освещении строительных площадок, стадионов, площадей.

В военном деле прожекторы употребляются для освещения и сигнализации.

Ещё Исаак Ньютон использовал вогнутое зеркало в телескопе. И в современных телескопах также используются вогнутые зеркала.

Вогнутые зеркала находят весьма важное применение при устройстве радиотелескопов, в радиолокаторах (для более длинного электромагнитного излучения).

Выпуклые зеркала устанавливают на дорогах для улучшения видимости при поворотах, применяют для обзора в транспорте («зеркала заднего вида»), *рис. 37*.

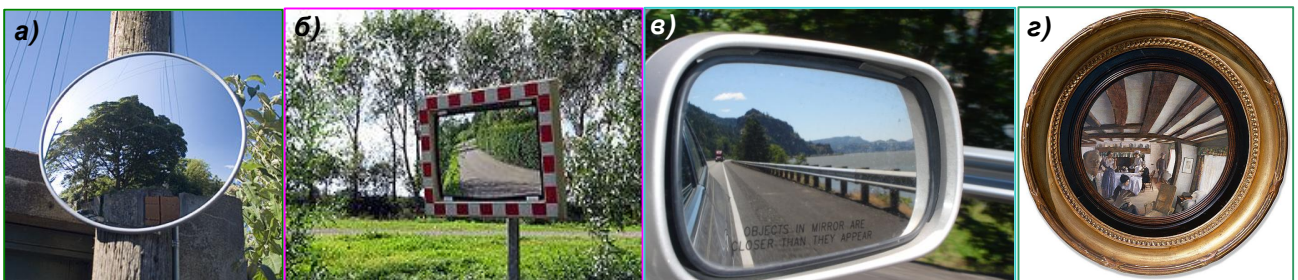


Рис. 37. Выпуклые зеркала: а) зеркало, установленное на столбе; б) зеркало для улучшения обзора дорожки; в) зеркало заднего вида на автомобиле; г) выпуклое зеркало в интерьере гостиницы.



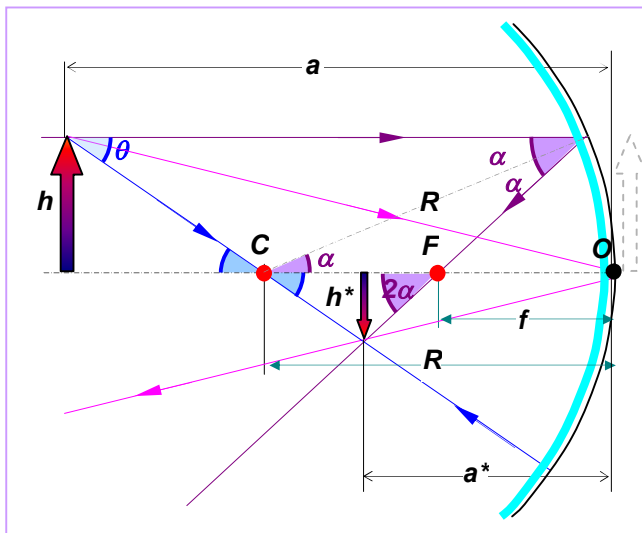
Рис. 38. Кривые зеркала: а) в «комнате смеха»; б) отражение в кривом зеркале.



Вопросы

1. Что такое плоское зеркало?
2. Каким является изображение в плоском зеркале?
3. Как вы понимаете выражение «мнимое изображение»? Чем различаются мнимое и действительное изображения?
4. Перечислите особенности изображения при отражении в плоском зеркале. Чем отличается предмет и изображение в плоском зеркале? Каковы их размеры, расстояния до зеркала? В чём их различия?
5. Что такое вогнутое зеркало? Что такое оптическая ось, оптический центр, радиус кривизны зеркала? Что такое фокус зеркала? Фокальная плоскость? Имеют ли смысл эти понятия для плоского зеркала? Почему?
6. Как построить изображение в плоском, вогнутом и выпуклом зеркалах? Почему называют вогнутые зеркала «собирающими»? Как следовало бы назвать изображения в плоском и выпуклом зеркалах?
7. Расскажите о применении плоских, вогнутых и выпуклых зеркал. Что такое перископ? Как устроен зеркальный гальванометр? Какую форму имеет зеркало «заднего вида»?
8. Если прикоснуться пальцем к плоскому стеклянному зеркалу в любом месте его поверхности, то палец и его изображение не соприкасаются. Почему? В каких зеркалах не наблюдается это оптическое явление?

ФОРМУЛА СФЕРИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА ДЛЯ ПАРАКСИАЛЬНЫХ СВЕТОВЫХ ЛУЧЕЙ (дополнение к §64)



К выводу формулы сферического зеркала

Предполагая, что лучи света близки к главной оси зеркала и составляют малые углы с ней (т. е. являются параксиальными лучами), можно считать, что $\text{tg}\theta \approx \sin\theta \approx \theta$; $\text{tg}2\theta \approx \sin2\theta \approx 2\theta$; $\text{tg}\alpha \approx \sin\alpha \approx \alpha$; $\text{tg}2\alpha \approx \sin2\alpha \approx 2\alpha$ (углы в радианах). Кроме того, будем считать, что высота сферического сегмента зеркала – величина пренебрежимо малая. В этом случае получим приближённую формулу в виде:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a^*} = \frac{1}{f} = \frac{2}{R}. \quad [1д]$$

Здесь a , a^* – расстояния от зеркала до объекта h (стрелки) и его изображения h^* соответственно; f – фокусное расстояние; R – радиус кривизны зеркала.

Формула легко получается, если учесть, что в принятом приближении

$$\text{tg}\alpha \approx \frac{h}{f} \approx \frac{h^*}{a^* - f}; \rightarrow \frac{h}{h^*} \approx \frac{f}{a^* - f}; \text{ и}$$

$$\text{tg}\theta \approx \frac{h}{a - 2f} \approx \frac{h^*}{2f - a^*}; \rightarrow \frac{h}{h^*} \approx \frac{a - 2f}{2f - a^*}.$$

Приравнявая выражения для отношения $\frac{h}{h^*}$, получим: $f(2f - a^*) = (a^* - f)(a - 2f) \rightarrow 2f^2 - fa^* = aa^* - af - 2fa^* + 2f^2; \rightarrow af + a^*f = aa^*$. Деля обе части последнего уравнения на aa^*f , получим искомое уравнение [1д] для сферического зеркала.

Кроме того, из подобия прямоугольных треугольников (образованных лучом, отражённым в точке O) следует соотношение для отношения размеров предмета и изображения:

$$\frac{h}{h^*} \approx \frac{a}{a^*}. \quad [2д]$$

§ 65. ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА. ЗАКОН ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА



1⁰. Если световой пучок падает на поверхность, разделяющую две прозрачные среды разной оптической плотности, например воздух и воду, то часть света отражается от этой поверхности, а другая часть — проникает во вторую среду. При переходе из одной среды в другую луч света изменяет направление на границе этих сред. Это явление называется **преломлением света**.

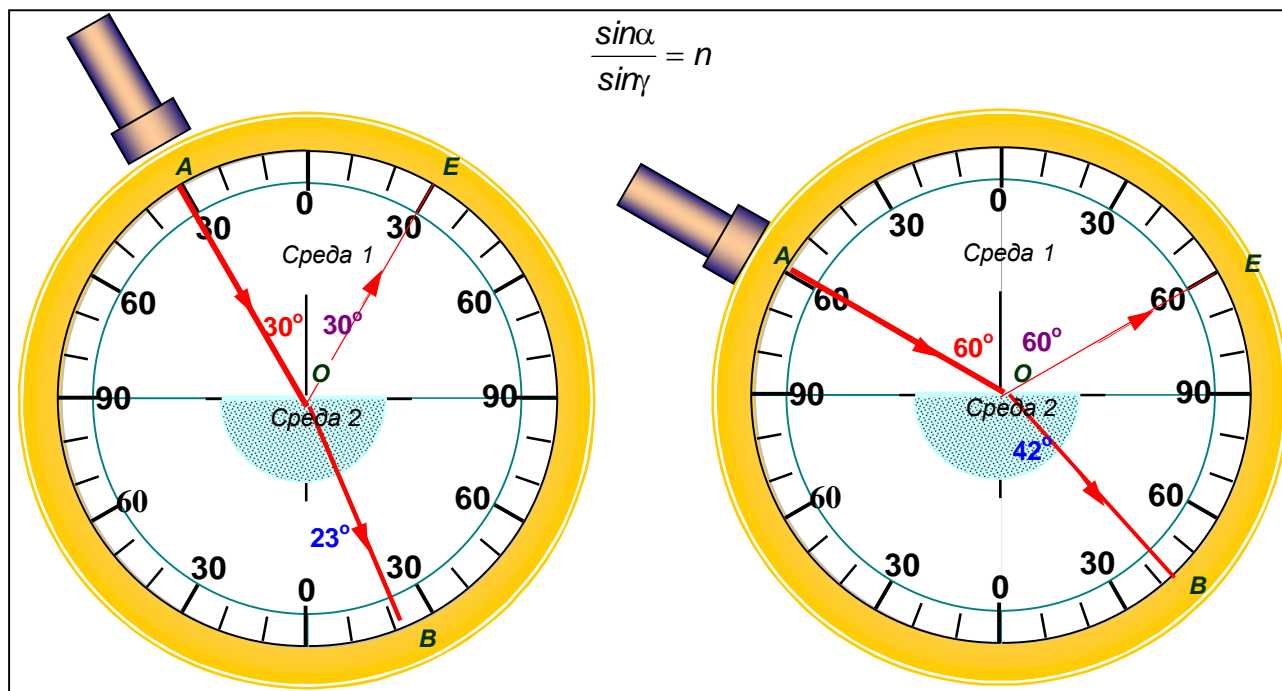
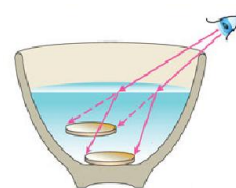


Рис. 39. При изменении угла падения α изменяется и угол преломления γ . Чем больше угол падения α , тем больше угол преломления γ . Если свет идет из среды оптически менее плотной в более плотную среду, то угол преломления всегда меньше угла падения: $\gamma < \alpha$. Луч света, направленный перпендикулярно к границе раздела двух сред, проходит из одной среды в другую без преломления.

Исследуя это явление, например, с помощью оптического диска (рис. 39), мы придём к выводу, что преломление светового луча происходит так, что:

1. Падающий и преломленный лучи, а также перпендикуляр, проведенный к границе раздела двух сред в точке падения луча, лежат в одной плоскости.
2. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для этих сред, называемая показателем преломления второй среды относительно первой n :

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n. \quad [2]$$

На рис. 39 обозначено: α — угол падения, β - угол отражения, γ — угол преломления. AO — падающий луч; OB — отраженный луч; OE — преломленный луч.

Заметим, что если бы мы направили луч по направлению EO , то в силу обратимости световых лучей он вышел бы из среды 2 по направлению OA .

2⁰. Кроме того, каждая среда, через которую проходит луч света, характеризуется **абсолютным показателем преломления**:

$$n_1 = \frac{c}{v_1}; \quad n_2 = \frac{c}{v_2}. \quad [3]$$

Абсолютный показатель преломления — это показатель преломления среды относительно вакуума. Он равен отношению скорости света в вакууме к

скорости света в данной среде. Поэтому он всегда больше единицы, так как скорость света в вакууме максимальна.

Значения абсолютного показателя преломления для некоторых веществ, приведены в таблице:

ВЕЩЕСТВО	ВОЗДУХ	ВОДЯНОЙ ПАР	ВОДА	ГЛИЦЕРИН	АЛМАЗ	СТЕКЛО
Абсолютный показатель преломления n	1,000292	1,000255	1,33	1,47	2,42	1,5÷1,9

Среда с меньшим абсолютным показателем преломления называется оптически менее плотной средой.

Для вакуума (воздуха) абсолютный показатель преломления среды $n_0 = 1$. Это значит, что **вакуум обладает наименьшей оптической плотностью.**

3⁰. **Относительный показатель преломления (показатель преломления второй среды относительно первой)** равен отношению соответствующих абсолютных показателей преломления:

$$n = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}. \quad [4]$$

Он показывает во сколько раз скорость света в той среде, из которой луч выходит, больше скорости света в той среде, в которую он входит.

Таким образом, явление преломления обусловлено изменением скорости распространения света при его переходе из одной среды в другую.

Чтобы определить, в какую сторону будет отклоняться луч света при его переходе через границу раздела двух сред, надо знать, в какой из сред скорость света меньше, а в какой больше.

4⁰. Закон преломления [2] можно вывести математически, если предположить, что световые лучи, параллельные до преломления, остаются таковыми и после преломления¹, рис. 40.

Если первая среда оптически менее плотная чем вторая, то скорости света в средах удовлетворяют неравенству: $v_1 > v_2$. Подходя к границе раздела сред MN , луч B_1B проходит отрезок пути CB со скоростью v_1 за некоторый промежуток времени Δt , рис. 41. Так что

$$CB = v_1 \Delta t.$$

Но за это время луч A_1A со скоростью v_2 проходит расстояние AD уже во второй среде. Так что

$$AD = v_2 \Delta t.$$

Поскольку треугольники ACB и BDA прямоугольные, можно написать

$$CB = v_1 \Delta t = AB \sin \alpha;$$

$$AD = v_2 \Delta t = AB \sin \beta.$$

Замечая, что $CB/AB = \sin \alpha$; а $AD/AB = \sin \beta$, получим искомую формулу закона преломления:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n. \quad [2]^2$$

Предполагая, что световые лучи, параллельные до отражения, остаются таковыми и после отражения, можно математически вывести закон отражения [1] аналогичным образом. Рекомендуем сделать это самостоятельно.

5⁰. Итак, луч света при переходе из воздуха в воду меняет своё направление, приближаясь к перпендикуляру в точке падения к границе сред. Вода — среда оптически более плотная, чем воздух. Если воду заменить какой-либо иной

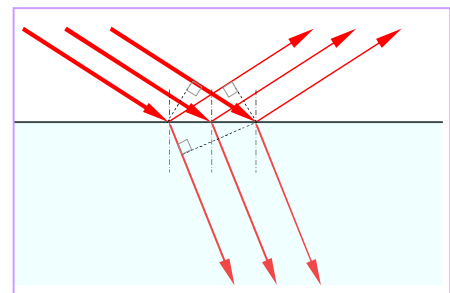


Рис. 40. Лучи, параллельные до преломления (отражения) остаются таковыми и после

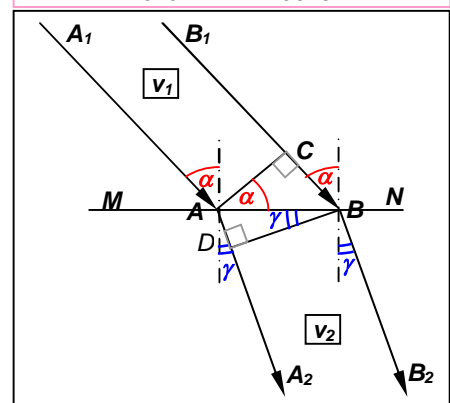


Рис. 41. Преломление параллельных лучей при прохождении границы различных прозрачных сред.

¹ Это предположение подтверждается экспериментально и является следствием принципа Х. Гюйгенса, с которым вы познакомитесь при изучении волновых явлений.

² Это соотношение называется **законом Снелла**. Виллеброрд Снелл (1580-1626) – датский астроном и математик.

прозрачной средой, оптически более плотной, чем воздух, то преломлённый луч также будет приближаться к перпендикуляру.

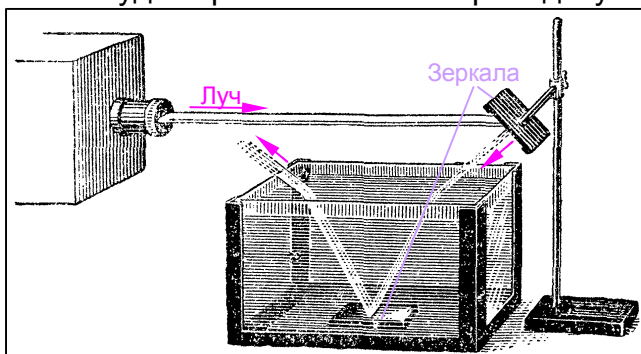


Рис. 42. Установка для исследования преломления света при переходе из воздуха в воду и из воды в воздух. Наглядно видна обратимость лучей при преломлении.

Если на пути преломлённого луча расположить перпендикулярно лучу зеркало, то свет отразится от зеркала и выйдет из воды в воздух симметрично направлению падающего луча, *рис. 42*.

Таким образом, если свет идёт из среды оптически более плотной в среду менее плотную, то угол преломления луча больше угла падения.

При более глубоком рассмотрении это ведёт к любопытным следствиям, одним из которых является **полное**

отражение.

5°. Наблюдение явлений отражения и преломления в случае перехода луча из среды оптически более плотной в среду менее плотную удобно провести, воспользовавшись аквариумом и источником, дающим узкие пучки света, *рис. 43*.

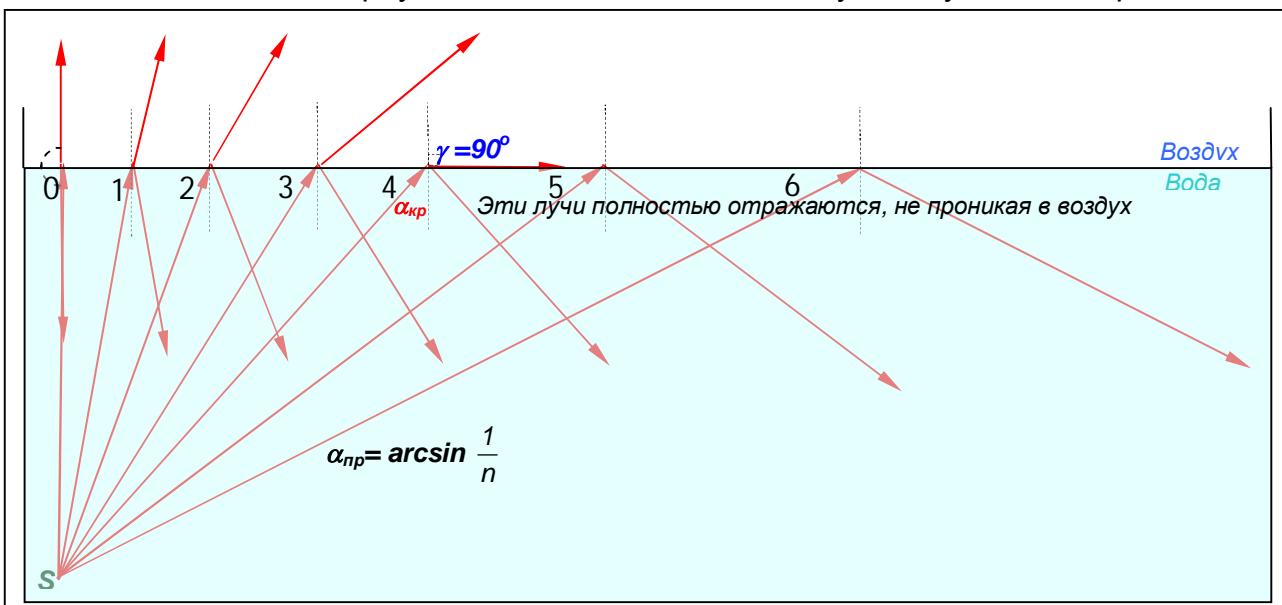


Рис. 43. Чем больше угол падения α , тем больше угол преломления γ . Если свет идет из среды оптически более плотной в менее плотную среду, то угол преломления может достигнуть $\gamma=90^\circ$, при некотором предельном значении угла падения $\alpha=\alpha_{пр}<90^\circ$. Луч начинает скользить вдоль поверхности раздела, не проникая в менее плотную среду. Наступает явление **полного отражения** от поверхности раздела сред.

Если увеличивать угол падения α , то можно заметить, что яркость (и, следовательно, энергия) отраженного пучка усиливается, в то время как яркость (энергия) преломленного пучка падает. Особенно быстро убывает энергия преломленного пучка, когда угол преломления γ приближается к 90° . Наконец, когда угол падения становится таким, что преломленный пучок идет вдоль границы раздела двух сред (луч 4 на *рис. 43*), доля отраженной энергии составляет почти 100%. Если повернуть источник света, увеличив угол падения до $\alpha_{пр}$, будет видно, что преломленный пучок исчез. А весь свет отражается от границы раздела двух сред, т. е. происходит **полное отражение света**.



Рис. 44. Так выглядят падающий, отражённый и преломлённый лучи при $\alpha \approx \alpha_{пр}$

Угол падения $\alpha_{пр}$, соответствующий углу преломления $\gamma=90^\circ$, называют **предельным углом полного отражения**. При этом $\sin\gamma=1$ и закон преломления [2] принимает вид:

$$\sin\alpha_{пр}=1/n,$$

где $n>1$ – показатель преломления более плотной среды относительно менее плотной. Откуда следует формула для определения **предельного угла полного отражения**:

$$\alpha_{пр} = \arcsin \frac{1}{n} \quad [5]$$

Например, для воды $\alpha_{пр}=48^\circ35'$ ($n = 1,33$), для стекла $\alpha_{пр}=41^\circ51'$ ($n = 1,5$), а для алмаза $\alpha_{пр}=24^\circ40'$ ($n = 2,42$). Во всех случаях второй средой является воздух.

6⁰. Явление полного отражения легко наблюдать на простом опыте. Нальем в стакан воду и поднимем его несколько выше уровня глаз. Поверхность воды, если рассматривать ее снизу сквозь стенку, кажется блестящей, словно посеребренной вследствие полного отражения света. Блестящей кажется и поверхность пруда из-под воды, *рис. 45*.



Рис. 45. Так выглядят поверхность пруда из-под воды

Явление полного отражения света используют в так называемой волоконной оптике для передачи света и изображения по пучкам прозрачных гибких

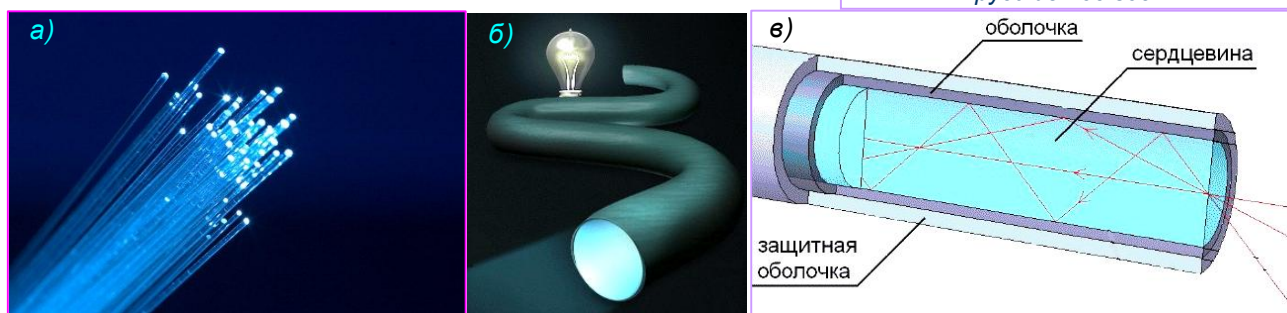


Рис. 46. Оптическое волокно. а) световоды – тонкие кварцевые или пластмассовые нити диаметром 50-500 мкм в оболочке из того же вещества, но с меньшим показателем преломления; б) передача света; в) так происходит полное отражение лучей в сердцевине кабеля волоконно-оптической линии связи.

волокон – световодов, *рис. 46*. Световод представляет собой стеклянное волокно цилиндрической формы, покрытое оболочкой из прозрачного материала с меньшим, чем у волокна, показателем преломления.

За счет многократного полного отражения свет может быть направлен по любому (прямому или изогнутому) пути. Волоконная оптика используется, например, в медицине для исследования внутренних органов, *рис.47*.

В последнее время волоконная оптика широко используется для быстрой передачи компьютерных сигналов.

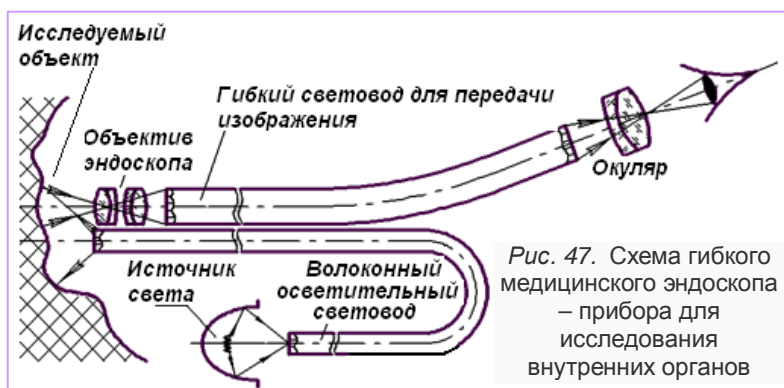


Рис. 47. Схема гибкого медицинского эндоскопа – прибора для исследования внутренних органов

Полное отражение – ещё один пример того, как вначале всего лишь любопытное физическое явление при его изучении и техническом использовании привело к революции в способах передачи информации.

7°. **Прохождение света через прозрачную пластинку с параллельными гранями.** Практическое значение имеет случай, когда свет переходит из одной среды в другую и затем снова выходит в первую, т. е. проходит через какое-либо прозрачное тело. Поверхности раздела могут быть разнообразными. Но мы разберём случай, когда свет проходит через пластинку с параллельными гранями.

Пусть AA_1BB_1 – плоскопараллельная пластинка, *рис. 48*.

Покажем, что луч SO света, падающего на пластинку, после двух преломлений выйдет наружу по направлению S_1O_1 параллельному SO .

Обозначим угол падения луча SO через α , а угол преломления через γ . Вследствие параллельности плоскостей AA_1 и BB_1 луч, пройдя стекло, встретит плоскость пластинки под углом $\gamma = \gamma_1$ и, следовательно, выйдет из неё под углом $\alpha_1 = \alpha$.

Таким образом, **луч света, проходя через пластину, смещается параллельно своему первоначальному направлению.**

При рассматривании предметов через плоскопараллельную пластину они будут казаться смещёнными.

8°. **Прохождение света через прозрачную трёхгранную призму, *рис. 48*.** AB и

AC – плоские поверхности призмы, ограничивающие её преломляющий угол φ . Плоскость чертежа перпендикулярна к обеим преломляющим поверхностям призмы и представляет собой сечение призмы. Пусть на грань AB призмы падает какой-нибудь одноцветный, например красный, пучок лучей света (на *рис. 49* показан только осевой луч DE этого пучка). В точке E луч DE преломится и пойдёт внутри призмы по направлению EF . У грани AC этот луч ещё раз преломится, отклонившись к основанию. Вышедший из призмы луч света после двукратного преломления отклонится на угол δ . Величина угла отклонения δ зависит от преломляющего угла призмы φ и показателя преломления вещества призмы.

Если рассматривать какой-либо предмет через трёхгранную призму, то предмет покажется смещённым к вершине угла, образованного плоскостями, через которые проходят лучи от источника, *рис. 50*.

9°. Если пропускать пучок лучей на одну из граней стеклянной равнобедренной прямоугольной призмы ABC *рис. 51*, то внутри призмы лучи отразятся от грани призмы AC , испытав полное отражение, так как в этом случае угол падения лучей на грань AC больше 42° , т. е. больше предельного угла для стекла. Прямоугольная призма ABC в положениях, показанных на рисунке, может быть использована для **поворота** светового пучка на 90° и для **обращения** какого-либо изображения, получающегося в оптическом приборе. В последнем случае нижние лучи, отразившись внутри призмы от грани AC , по выходе из призмы становятся верхними, а верхние нижними. Такая призма называется **оборотной** и применяется во многих оптических приборах, в частности в призматическом бинокле.

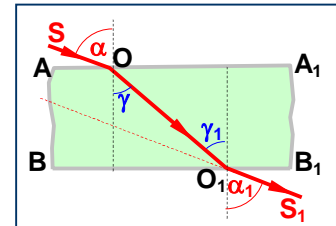


Рис. 48. Преломление в плоскопараллельной пластине

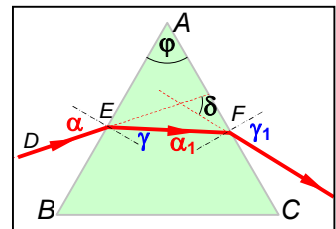


Рис. 49. Преломление в трёхгранной призме

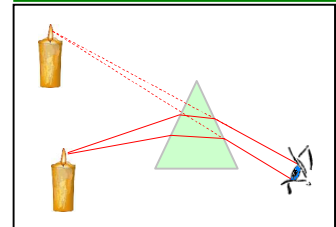


Рис. 50. Изображение свечи через трёхгранную призму

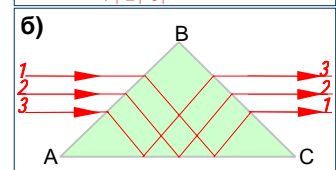
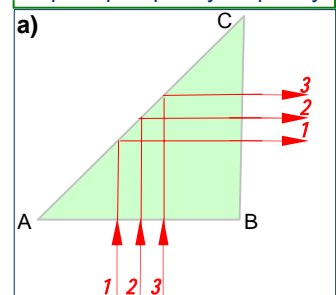


Рис. 51. Поворотная (а) и обратная (б) призмы

10°. **Разложение белого света в спектр.** При преломлении белого света в призме происходит еще одно оптическое явление, о котором мы пока не говорили. Впервые экспериментально его исследовал И. Ньютон.

Ньютон направил на призму световой пучок малого поперечного сечения: пучок солнечного света проходил в затемненную комнату через маленькое отверстие в ставне окна. Падая на стеклянную призму, он преломлялся и давал на противоположной стене удлиненное изображение с радужным чередованием цветов, *рис. 52*. Следуя многовековой традиции, согласно которой радуга считалась состоящей из семи основных цветов, Ньютон тоже выделил семь цветов: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый. Саму радужную полоску Ньютон назвал **спектром**.

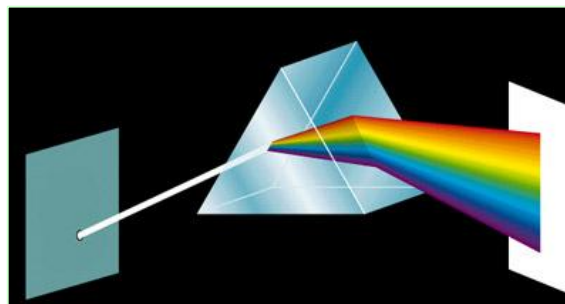


Рис. 52. Опыт Ньютона по разложению белого света в спектр.

Закрыв отверстие красным стеклом, Ньютон наблюдал на стене только красное пятно, закрыв синим стеклом – синее пятно и т. д. Это означало, что не призма окрашивает белый свет, как предполагалось раньше. Призма не изменяет свет, а лишь разлагает его на составные части. **Белый свет имеет сложный состав.** Из него можно выделить пучки различных цветов, но лишь совместное их действие вызывает у нас впечатление белого цвета.

В этом можно убедиться, если с помощью второй призмы, повернутой на 180° относительно первой, собрать все пучки спектра: опять получится белый свет. Но выделив какую-либо часть спектра, например зеленую, и заставив этот свет пройти еще через одну призму, мы уже не получим дальнейшего изменения окраски.

Еще один простой опыт. Картонный круг разделен на сектора, каждый из которых раскрашен в цвет, соответствующий одной из составляющих белого света. Этот круг укреплен на оси. При вращении круга цвета сливаются, и круг кажется белым, *рис. 53*. Эти свойства составляющих белого света широко используются в осветительной

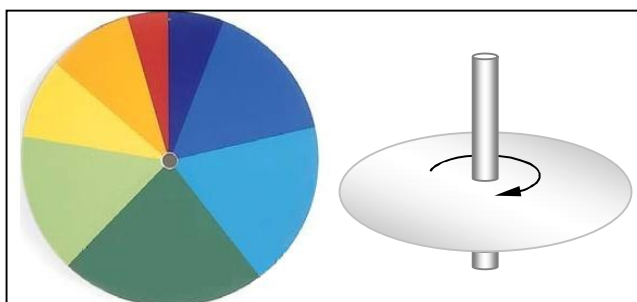


Рис. 53. Круг с подобранными составляющими белого света при вращении кажется белым.

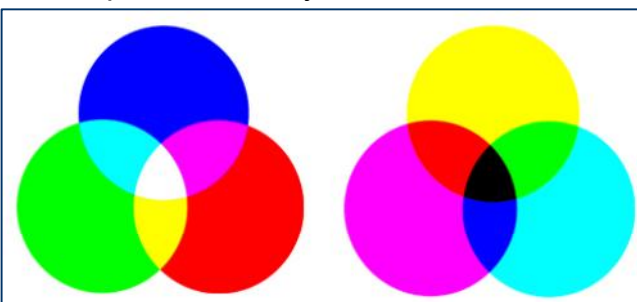


Рис. 54. При наложении друг на друга цветных пятен света можно получить белый и даже чёрный цвета

технике, *рис.54*.

Другой важный вывод, к которому пришел Ньютон, был сформулирован им в трактате «Оптика» следующим образом: **«Световые пучки, отличающиеся по цвету, отличаются по степени преломляемости»** (для них стекло имеет различные показатели преломления). Наиболее сильно преломляются фиолетовые лучи, меньше других - красные, *см. табл.* Зависимость показателя преломления света от его цвета Ньютон назвал **дисперсией**.

Абсолютный показатель преломления для оптического стекла						
Цвет	Фиолетовый	Синий	Зелёный	Желтый	Оранжевый	Красный
Показатель преломления	1,532	1,528	1,519	1,517	1,514	1,513

Вам известно, что показатель преломления зависит и от скорости света в веществе (см. формулу [3]). Луч красного цвета преломляется меньше из-за того, что красный свет имеет в веществе наибольшую скорость, а луч фиолетового цвета преломляется больше, так как скорость для фиолетового света наименьшая. Именно поэтому призма и разлагает свет. В пустоте скорости света разного цвета одинаковы.

Впоследствии была выяснена зависимость цвета от физической характеристики световой волны: ее частоты колебаний ν (или длины волны λ). Поэтому можно дать более глубокое определение дисперсии, чем то, к которому пришел Ньютон. **Дисперсией называется зависимость показателя преломления среды от частоты световой волны.** Подробнее с этим вы ознакомитесь в дальнейшем.

11⁰. Ввиду того что составляющие белого света обладают различием в своих свойствах, они по-разному взаимодействуют с веществами, т. е. по-разному *отражаются, преломляются и поглощаются.* Этим можно объяснить удивительное многообразие красок в природе. Если предмет, например лист бумаги, отражает все падающие на него лучи различных цветов, то он будет казаться белым. Покрывая бумагу слоем красной краски, мы не создаем при этом свет нового цвета, но задерживаем на листе некоторую часть имеющегося. Отражаться теперь будут только красные лучи, остальные же поглотятся слоем краски. Трава и листья деревьев кажутся нам зелеными потому, что из всех падающих на них солнечных лучей они отражают лишь зеленые, поглощая остальные.

Поверхность белого цвета хорошо отражает все составляющие белого света. Ну а черный цвет? *Черные тела поглощают все составляющие белого света, ничего не отражая.*

Часто мы наблюдаем свет, проходящий сквозь *фильтры.* Вспомните светофор. Зеленый свет, например, возникает по следующей причине. Лампа накаливания излучает обычный для нее сложный по составу свет. Однако при прохождении этого света сквозь фильтр происходит поглощение большинства его составляющих, кроме тех, что соответствуют зеленому цвету. Желтый фильтр поглощает все составляющие белого света, но пропускает те, которые вызывают у человека ощущение желтого цвета.

Различным преломлением составляющих белого света, разложением его в спектр объясняется такое явление, как радуга. Спектральное разложение в радуге объясняется преломлением солнечного света в мельчайших каплях влаги, находящихся в воздухе во взвешенном состоянии, *рис. 55÷56.*

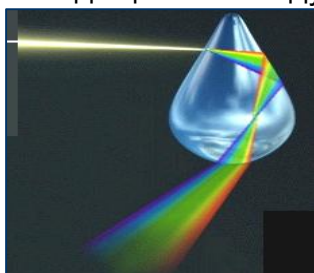


Рис. 55. Преломление и отражение света в капле



Рис. 56. Радуга – результат преломления и отражения света в капельках воды

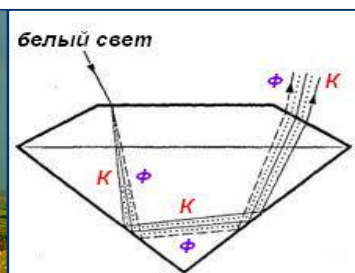


Рис. 57. Огранка изделий с целью получения спектра

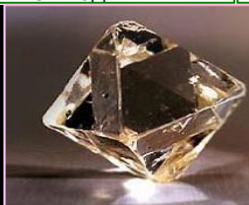
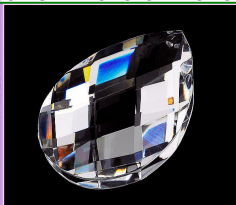


Рис. 58. Гранёный хрусталь и прозрачные камни можно заставить сиять всеми цветами радуги при освещении их белым светом.

Гранёный хрусталь и прозрачные камни можно заставить сиять всеми цветами радуги при освещении их белым светом. Это широко используется, *рис. 57÷58.*

Явление дисперсии, открытое Ньютоном, – первый шаг к пониманию природы цвета. Основательно понять дисперсию смогли лишь после того, как была выяснена зависимость цвета от частоты колебаний (или длины световой волны).



Вопросы

1. Что называют преломлением света?
2. Какой угол называют углом преломления?
3. Что такое показатель преломления? Как он связан со скоростью распространения света в среде? Почему используют понятия «абсолютный» и «относительный» показатели преломления? В чем их физический смысл?
4. Какая среда является оптически более плотной: лед или кварц? Почему?
5. В каком случае угол преломления света меньше угла падения, и в каком больше?
6. Чему равен угол падения луча, если преломленный луч перпендикулярен границе раздела сред?
7. Почему наблюдателю, смотрящему сверху на воду, глубина водоема кажется меньше, чем на самом деле?
8. В воздухе находятся куски стекла, кварца и алмаза. На чьей поверхности лучи света преломляются сильнее всего?
9. Что такое полное отражение света? Когда оно происходит? Как используется? Что такое предельный угол полного отражения? Как он определяется?
10. Как происходит преломление света в плоскопараллельной пластинке и в призме?
11. Опишите опыт по разложению белого света в спектр, проведенный Ньютоном.
12. Как можно объяснить разложение света в спектр при прохождении его сквозь призму?
13. Какова последовательность цветов в спектре?
14. Чем объясняется различие в цвете окружающих нас предметов? Почему гранёный хрусталь переливается всеми цветами радуги? Какие оптические явления являются причиной этого?
15. Объясните картину, которую мы наблюдаем, глядя па лист белой бумаги сквозь зеленый фильтр.
16. Как объяснить черный цвет предметов?



Рис. 59. Запомни последовательность семи цветов спектра с помощью этой картинки.



Упражнение

1. Повторите опыт Евклида. Положите на дно чайной чашки кольцо (или монету), после чего расположите ее перед собой так, чтобы края чашки закрывали ее дно. Если, не меняя взаимного расположения чашки и глаз, налить в нее воду, то кольцо (или монета) становится видимым. Почему?
2. На белом листе бумаги написаны две буквы: буква А красным цветом, буква В – зелёным. Через какой светофильтр надо посмотреть: а) чтобы увидеть букву А и не увидеть букву В; б) чтобы увидеть буквы одновременно?
3. На стеклянную треугольную призму направлены два узких световых пучка - синий и красный. Изобразите примерный ход этих пучков через призму и по выходе из нее. Сохранят ли свою цветность пучки, пройдя сквозь призму?



§ 66. ЛИНЗЫ. ОПТИЧЕСКАЯ СИЛА ЛИНЗЫ



1⁰. Основной частью оптических приборов являются линзы.

Линзой называют прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями. Эти поверхности для линзы являются рабочими, преломляющими проходящие лучи света. Радиусы кривизны R_1 и R_2 этих поверхностей называются радиусами кривизны линзы, *рис. 60*.

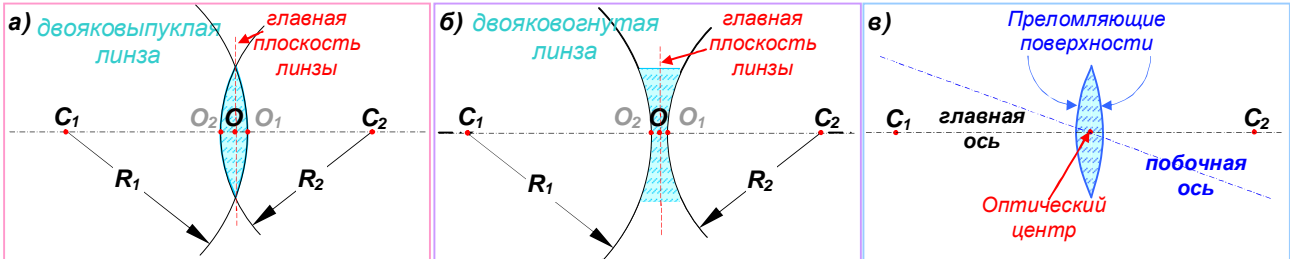


Рис. 60. Тонкие сферические линзы: O – оптический центр, C_1 и C_2 – центры ограничивающих линзу сферических преломляющих поверхностей, R_1 и R_2 – радиусы кривизны, O_2O_1 – толщина линзы мала по сравнению с R_1 и R_2

2⁰. **Тонкая линза.** Мы будем предполагать, что толщина линзы O_2O_1 пренебрежимо мала по сравнению с радиусами R_1 и R_2 сферических поверхностей линзы и расстоянием линзы до интересующего нас предмета. Такую линзу называют **тонкой линзой**. В дальнейшем будут рассматриваться только тонкие линзы.

Точки O_2 и O_1 – вершины сферических сегментов – расположены в тонкой линзе так близко друг к другу, что их можно принять за одну точку, которую называют **оптическим центром линзы** и обозначают буквой O , *рис. 60*. Луч света, который проходит через оптический центр линзы, не изменяет своего направления, а только смещается (как в плоскопараллельной пластинке), но, так как линза тонкая, смещение мало и им пренебрегают.

Прямую, проходящую через центры C_1C_2 сферических поверхностей линзы, называют **главной оптической осью**. Она проходит через центр O . Любую другую прямую, проходящую через оптический центр O , называют **побочной оптической осью**, *рис. 60*, в.

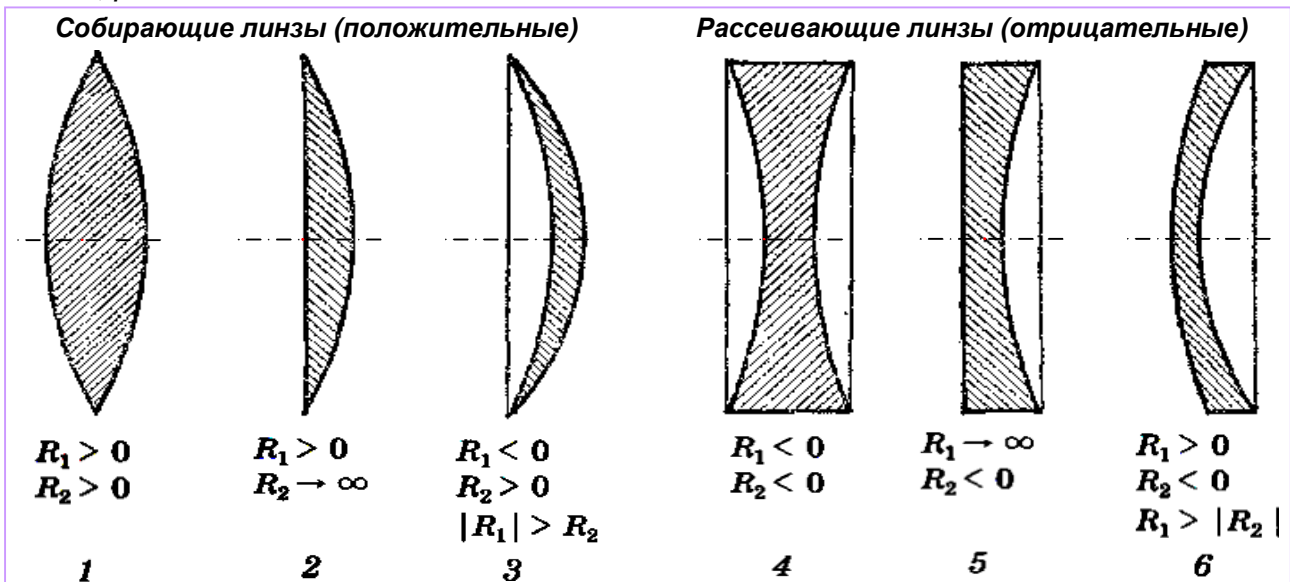


Рис. 61. Линза (от лат. lens - чечевица). Типы линз: 1 – двояковыпуклая; 2 – плосковыпуклая; 3 – вогнуто-выпуклая; 4 – двояковогнутая; 5 – плосковогнутая; 6 – выпукло-вогнутая. Радиусы кривизны выпуклых преломляющих поверхностей считаются положительными ($R > 0$), а вогнутых – отрицательными ($R < 0$).

3⁰. **Типы линз**, *рис. 61*. Линза может быть ограничена двумя выпуклыми сферическими поверхностями (**двояковыпуклая линза 1**), выпуклой сферической поверхностью и плоскостью (**плосковыпуклая линза 2**), выпуклой и вогнутой

сферическими поверхностями (**вогнуто-выпуклая линза 3**). Эти линзы посередине толще, чем у краев, и поэтому все они называются **выпуклыми** (положительными).

Линзы, которые посередине тоньше, чем у краев, называются **вогнутыми** (отрицательными). На *рис. 61* изображены три вида вогнутых линз: **двояковогнутая линза 4**, **плосковогнутая линза 5** и **выпукло-вогнутая 6**.

4⁰. Преломляя лучи, линзы действуют как совокупность призм, *рис. 62*.

Выпуклая линза, преломляя падающие на неё лучи, собирает их. Поэтому такая линза называется **собирающей**. В воздухе каждая призма отклоняет лучи к основанию. Поэтому все лучи, идущие через собирающую линзу, отклоняются в сторону ее главной оптической оси, *слева*.

Вогнутая же линза, преломляя свет, рассеивает его в стороны. Такая линза называется **рассеивающей**.

5⁰. Тонкая линза – это очень удобная идеализированная модель реальной линзы, позволяющая упрощённо рассматривать ход лучей в оптических приборах, не вникая в подробности довольно сложного действительного процесса преломления световых лучей. Условные обозначения тонких собирающей и рассеивающей линз показаны на *рис. 62, справа*.

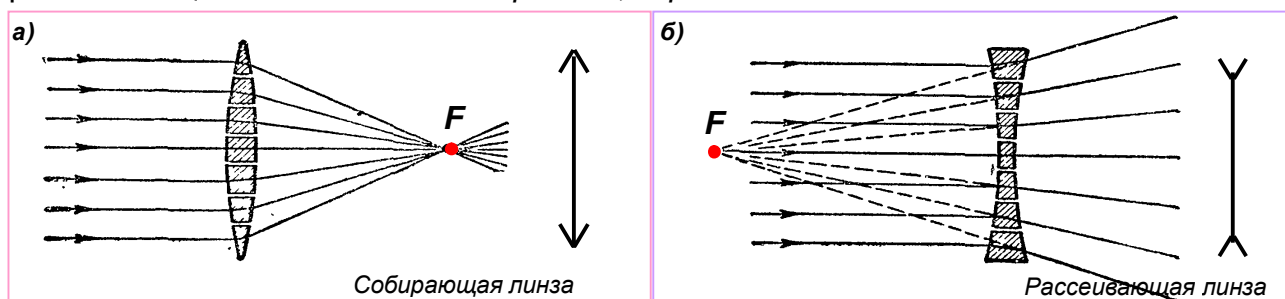


Рис. 62. Линзы действуют как совокупности призм. Преломляя лучи, каждая призма отклоняет их к своему основанию. Поэтому выпуклые линзы собирают, а вогнутые – рассеивают лучи. F – точка (фокус), где пересекаются параллельные лучи после преломления в собирающей линзе, или их продолжения в обратную сторону – в рассеивающей линзе. Справа показаны обозначения тонких линз.

6⁰. Точка F , где пересекаются падающие параллельные лучи после преломления в собирающей линзе, или их продолжения в обратную сторону – в рассеивающей линзе, называется **главным фокусом** (или просто **фокусом**) линзы. У собирающих линз фокус действительный; у рассеивающих линз – мнимый.

Плоскость, проведённая через фокус F перпендикулярно главной оптической оси и параллельно главной плоскости линзы, называется **фокальной плоскостью**. Фокальную плоскость обозначим буквой π , *рис. 63*.

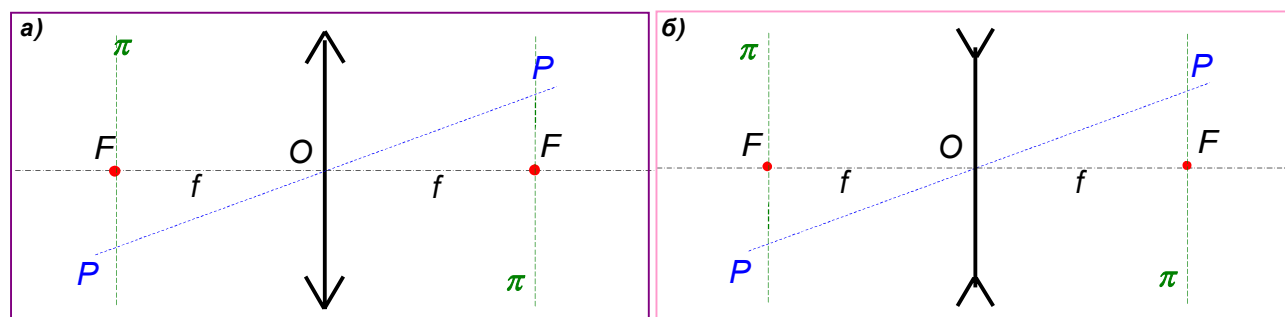


Рис. 63. Основные линии, плоскости, точки и обозначения тонких линз. Главная FF' и **побочная PP'** оптические оси, главные F и **побочные P** фокусы и **фокальные плоскости π** , а также фокусные расстояния $f = OF$ собирающей (а) и рассеивающей (б) тонких линз.

У всякой линзы **два фокуса** и **две фокальные плоскости** – с каждой из её сторон. Если слева и справа от линзы одна и та же среда, то они располагаются симметрично на одинаковых расстояниях от линзы.

Расстояние от оптического центра линзы O до ее фокуса называют **фокусным расстоянием** линзы. Фокусное расстояние OF обозначим буквой f .

Любая точка пересечения **побочной** оптической оси с **фокальной плоскостью** π называется **побочным фокусом линзы** P . Таким образом, каждая точка (кроме точки F) фокальной плоскости может быть побочным фокусом.

7°. **Фокусное расстояние** линзы f зависит от радиусов кривизны R_1 и R_2 ее поверхностей. Линза с более выпуклыми преломляющими поверхностями преломляет лучи сильнее, чем линза с менее выпуклыми поверхностями. Более выпуклая линза обладает меньшим фокусным расстоянием.

Для определения фокусного расстояния собирающей линзы выйдите на освещенное солнцем место. С помощью линзы сфокусируйте солнечные лучи на лист бумаги. Изменяя расстояние между линзой и бумагой, добейтесь наименьшего размера полученного пятнышка. Как правило, при этом бумага начинает обугливаться. Расстояние между линзой и листом бумаги в этот момент будет соответствовать фокусному расстоянию линзы f , *рис. 64*. Яркая точка будет располагаться практически точно в фокусе линзы, так как лучи от Солнца ввиду его чрезвычайной удаленности параллельны.

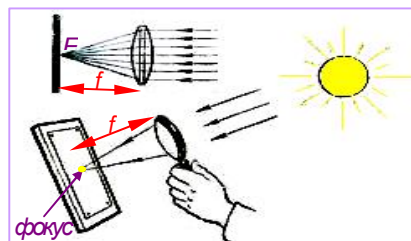


Рис. 64. Определение фокусного расстояния собирающей линзы.

7°. Физическая величина, обратная фокусному расстоянию линзы, обозначается буквой D и называется **оптической силой линзы**:

$$D=1/f. \quad [6]$$

Оптическая сила является основной характеристикой линзы.
 Принято считать, что, если линза собирающая $f>0$ и $D>0$.
 Если линза рассеивающая $f<0$ и $D<0$.

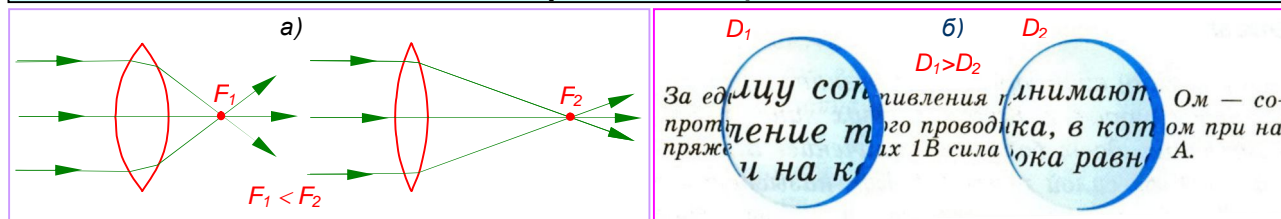


Рис. 65. Здесь изображены две выпуклых линзы ($D_1>D_2>0$). Линза с более выпуклыми поверхностями преломляет свет больше, чем линза меньшей кривизны (с большими радиусами кривизны). Линзы с меньшими фокусными расстояниями имеют большую оптическую силу и дают большее увеличение.

Чем ближе к линзе ее фокусы, тем сильнее линза преломляет лучи, собирая или рассеивая их, и тем больше (по модулю) её оптическая сила, *рис. 65*.

8°. Единицей оптической силы в СИ является метр в минус первой степени (m^{-1}). Иначе эта единица называется **диоптрией** (дптр).

1 диоптрия – это оптическая сила линзы, фокусное расстояние которой равно 1 м.

Если фокусное расстояние линзы меньше 1 м, то оптическая сила будет больше 1 дптр. В случае, когда фокусное расстояние линзы больше 1 м, ее оптическая сила меньше 1 дптр. Например,

если $f = 0,2$ м, то $D = \frac{1}{0,2\text{м}} = 5$ дптр (собирающая линза);

если $f = 2$ м, то $D = \frac{1}{2\text{м}} = 0,5$ дптр (собирающая линза);

если $f = -0,2$ м, то $D = -\frac{1}{0,2\text{м}} = -5$ дптр (рассеивающая линза).

Таким образом, у **собирающих и рассеивающих линз оптические силы отличаются знаком**. Собирающие линзы обладают положительным фокусным расстоянием и оптической силой: $f>0$, $D>0$. Рассеивающие линзы обладают отрицательным фокусным расстоянием и оптической силой: $f<0$, $D<0$.

9⁰. Теория даёт формулу, по которой можно рассчитать оптическую силу линзы:

$$D = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad [7]$$

В этой формуле n – показатель преломления вещества линзы, R_1 и R_2 – радиусы кривизны поверхностей линзы. Радиусы кривизны выпуклых поверхностей считаются положительными, вогнутых поверхностей – отрицательными.

До сих пор мы считали выпуклую линзу собирающей, положительной, а вогнутую – рассеивающей, отрицательной. Это правильно, но при условии, что материал линзы оптически более плотный, чем окружающая среда. В этом случае в формуле [7] показатель преломления $n > 1$. Если же окружающая среда имеет оптическую плотность большую, чем материал линзы (так будет, например, для воздушного сферического пузырька в воде), то выпуклая линза будет рассеивающей, а вогнутая – собирающей. Это следует из формулы [7], когда $n < 1$.

Ниже мы всегда будем предполагать, что вещество линзы имеет оптическую плотность большую, чем окружающая среда.

10⁰. Многие оптические приборы состоят из нескольких линз. Оптическая сила системы нескольких близкорасположенных линз равна сумме оптических сил всех линз этой системы. Если, например, имеются две линзы с оптическими силами D_1 , и D_2 , то их общая оптическая сила будет равна:

$$D = D_1 + D_2. \quad [8]$$

Обратите внимание, что складываются при этом лишь оптические силы. Фокусные расстояния складывать не имеет смысла, так как фокусное расстояние нескольких линз не совпадает с суммой фокусных расстояний отдельных линз.



Вопросы

1. Что называют линзой?
2. Чем отличаются выпуклые линзы от вогнутых линз?
3. Какие линзы являются собирающими, какие рассеивающими? Как их обозначают?
4. Что называют главной и побочной оптической осью линзы?
5. Какую точку называют главным, а какую побочным фокусом линзы?
6. Что такое фокусное расстояние линзы? Что такое фокальная плоскость линзы?
7. Что называют оптической силой линзы?
8. Как называется единица оптической силы линзы?
9. Каким образом можно измерить фокусное расстояние собирающей линзы?
10. У каких линз оптическая сила положительная, у каких отрицательная?
11. Как находится оптическая сила системы нескольких линз?
12. Сколько раз преломляется луч света, проходящий через линзу?
13. Может ли быть выпуклая линза рассеивающей? Если да, в каких случаях и почему?



Изображения в капле воды и в стеклянной линзе.

§ 67. ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ДАВАЕМЫХ ЛИНЗОЙ

1⁰. При помощи линз можно получать изображения предметов, благодаря чему линзы широко используются на практике.

Так, линзы в киноаппаратах дают увеличенное в сотни раз изображение маленького кинокадра, а в фотоаппарате такие же линзы дают уменьшенное изображение фотографируемого предмета, уместяющееся внутри аппарата. Как же получаются столь различные изображения?

Особенности получаемого изображения зависят от взаимного расположения предмета и линзы. Изменяя расстояние между ними, можно увеличить или уменьшить изображение, сделать его прямым или обратным (перевернутым), действительным или мнимым.

Получение изображений точек, а также протяженных предметов (совокупностей точек) является центральной задачей геометрической оптики.

Чтобы получить изображение, необходимо разобраться, как осуществляется ход лучей через линзу от точек предмета до точек изображения.

2⁰. Проще всего лучи проходят **через оптический центр** линз. Понятно, что лучи, идущие вдоль главной оптической оси, проходят сквозь линзы без преломления: они перпендикулярны преломляющим поверхностям линзы. Оказывается это верно (для тонких линз) и для лучей, идущих вдоль побочной оптической оси – наклонно к главной оптической оси (если углы наклона малы¹). Последнее обусловлено тем, что вблизи оптического центра O линзу можно считать тонкой плоскопараллельной пластинкой, *рис. 66*.

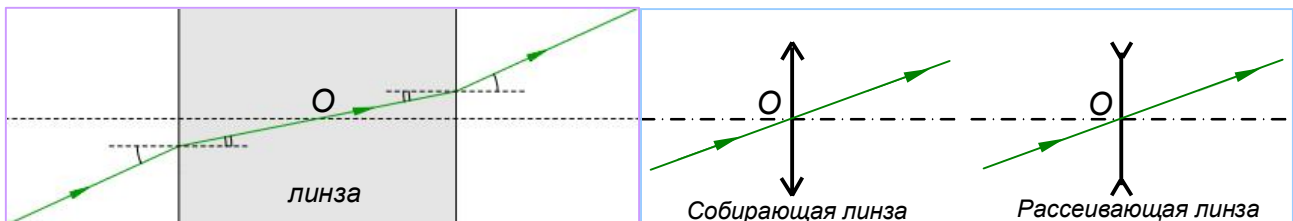


Рис. 66. Проходя через оптический центр реальной линзы O , луч преломляется так же, как в плоскопараллельной пластине – он чуть-чуть смещается. Но это смещение ничтожно мало, если линза тонкая.

Правило 1. Лучи, идущие через оптический центр тонкой линзы, не преломляются.

Это единственное общее свойство собирающей и рассеивающей линз. Остальные особенности прохождения лучей в них придётся рассматривать отдельно.

Ниже рассмотрим отдельно собирающую и рассеивающую линзы.

3⁰. **Собирающая линза** собирает световой поток, параллельный главной оптической оси, в одной точке на этой оси – в главном фокусе F , *рис. 67, а*.

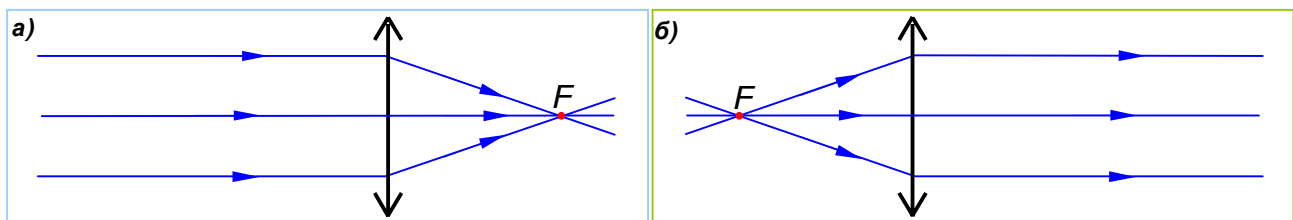


Рис. 67. Параллельные главной оптической оси линзы лучи, после собирающей линзы сходятся в главном фокусе линзы F (а).

Лучи, попадающие на линзу через главный фокус F , за линзой параллельны главной оптической оси (б).

Из обратимости световых лучей следует, что лучи, попадающие на линзу через главный фокус F , за линзой параллельны главной оптической оси, *рис. 67, б*.

¹ Лучи, идущие вблизи главной оптической оси под малыми углами к ней, называют *параксиальными* лучами.

4⁰. Аналогично выглядит ход *наклонных* лучей, параллельных побочной оптической оси: они сходятся за линзой в побочном фокусе P . А лучи попадающие на линзу из побочного фокуса P , за линзой преобразуются в лучи, параллельные побочной оптической оси, проходящей через этот фокус, *рис. 68*.

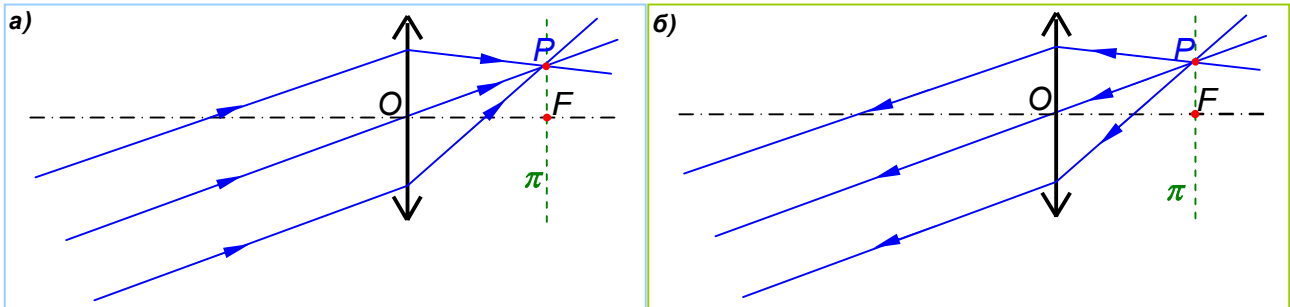


Рис. 68. Параллельные побочной оси лучи – идущие под углом к главной оптической оси, после собирающей линзы, сходятся в побочном фокусе P (а). Лучи, попадающие на линзу из побочного фокуса P , за линзой идут параллельно побочной оптической оси, проходящей через этот фокус (б).

5⁰. Рассмотренные три примера (*рис. 66÷68*) позволяют сформулировать правила построения хода лучей в собирающей линзе.

Правило 1. Луч, идущий через оптический центр линзы, не преломляется, *рис. 66*.

Правило 2. Луч, идущий параллельно главной оптической оси линзы, после линзы пройдет через главный фокус F , *рис. 69, а*.

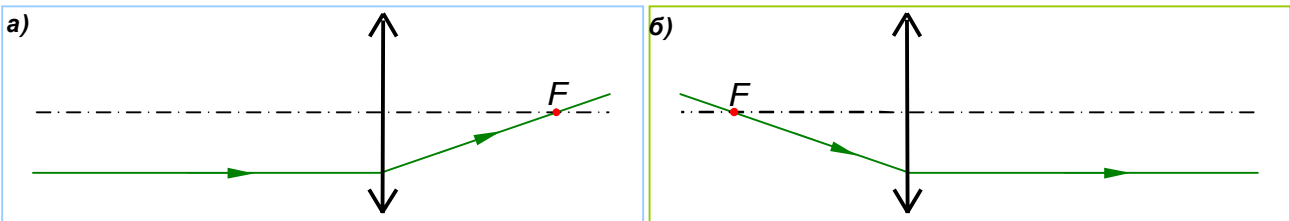


Рис. 69. Правило 2. Луч, идущий параллельно главной оптической оси линзы, после линзы пройдет через главный фокус F (а).

Луч, идущий через главный фокус, после прохождения линзы идет параллельно главной оптической оси (б).

Луч, идущий через главный фокус, после линзы идет параллельно главной оптической оси линзы, *рис. 69, б*.

Правило 3. Луч, падающий на линзу наклонно, для своего продолжения требует построения *вспомогательной* параллельной побочной оптической оси до пересечения с фокальной плоскостью π в точке P , через которую и пройдет луч после линзы, *рис. 70, а*.

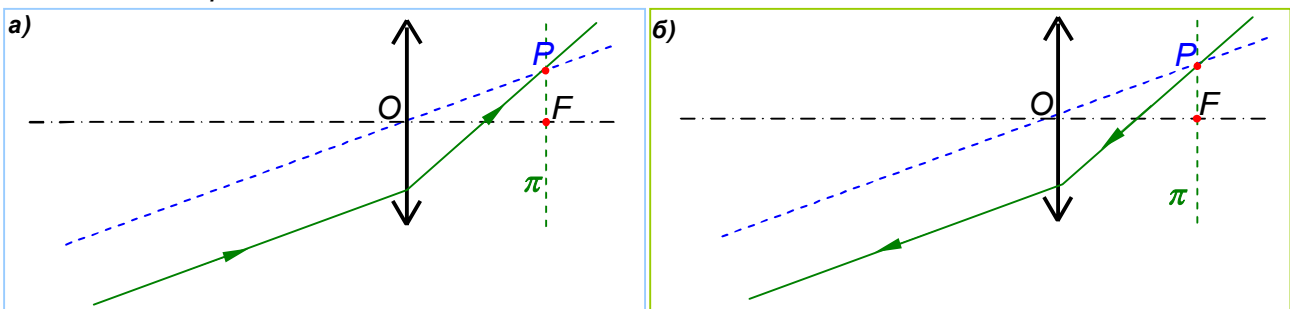


Рис. 70. Правило 3. Луч, падающий на линзу наклонно, после неё идет через побочный фокус P параллельной ему побочной оси (а). Луч из точки P фокальной плоскости, за линзой идет параллельно побочной оптической оси, проходящей через эту точку (б).

Луч из точки P фокальной плоскости за линзой идет параллельно побочной оптической оси, проходящей через эту точку, *рис. 70, б*.

6°. **Рассеивающая линза** (рис. 62, б) преобразует пучок света, параллельный главной оптической оси, в расходящийся, как бы исходящий из главного фокуса F , рис. 71, а.

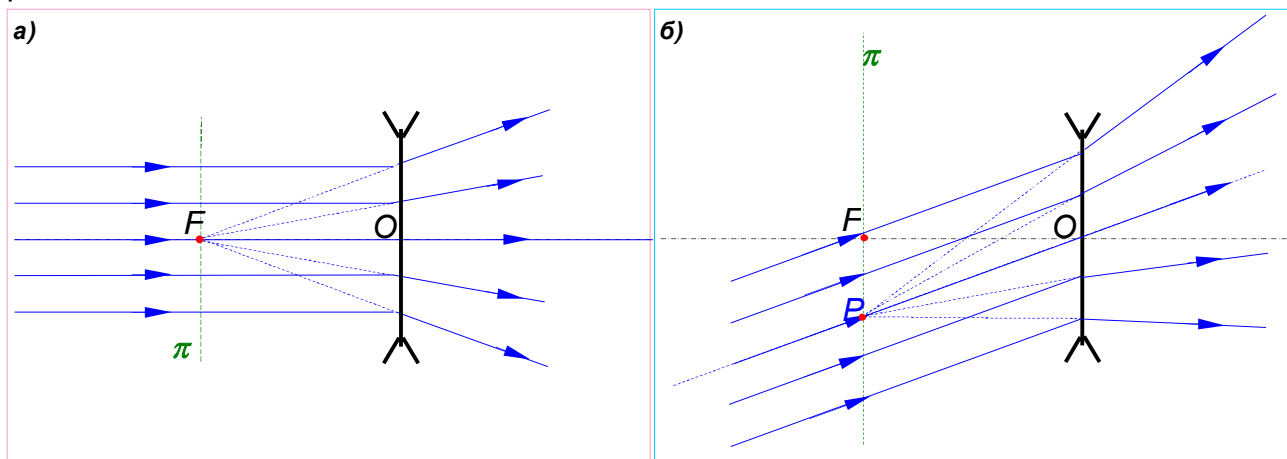


Рис. 71. Рассеивающая линза преобразует пучок света, параллельный главной оптической оси, в расходящийся, как бы исходящий из главного фокуса F (а). Поток света, падающий на линзу наклонно, после преломления становится расходящимся, как бы исходящим из побочного фокуса P побочной оси PO (б).

Поток света, падающий на линзу наклонно, параллельно побочной оси PO , после преломления становится расходящимся, как бы исходящим из побочного фокуса P , рис. 71, б.

7°. Рассмотренные примеры (рис. 66, а, и рис. 71) позволяют сформулировать три правила построения хода лучей в рассеивающей линзе.

Правило 1. Луч, идущий через оптический центр линзы, не преломляется, рис. 66.

Правило 2. Луч, идущий параллельно главной оптической оси линзы, после линзы начинает удаляться от главной оптической оси так, что его продолжение в обратную сторону проходит через главный фокус линзы F , рис. 72, а.

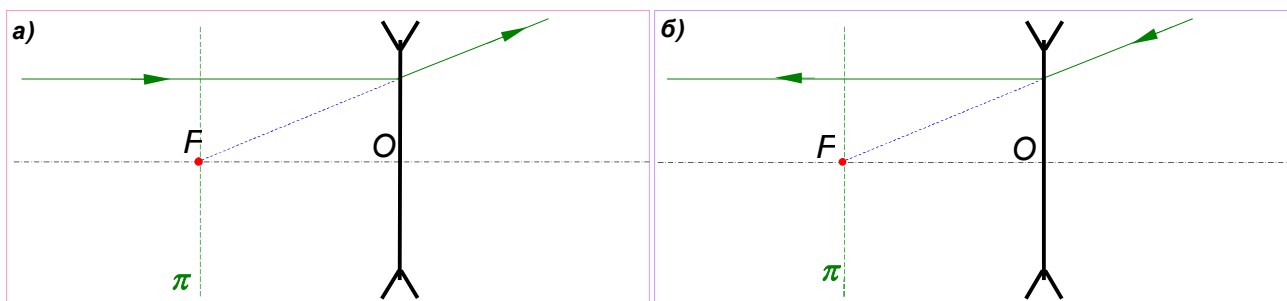


Рис. 72. **Правило 2.** Луч параллельный главной оптической оси, преломившись, идёт так, что его продолжение в обратную сторону проходит через главный фокус линзы F (а). Луч, направленный на главный фокус перед линзой, преобразуется за ней в луч, параллельный главной оптической оси (б).

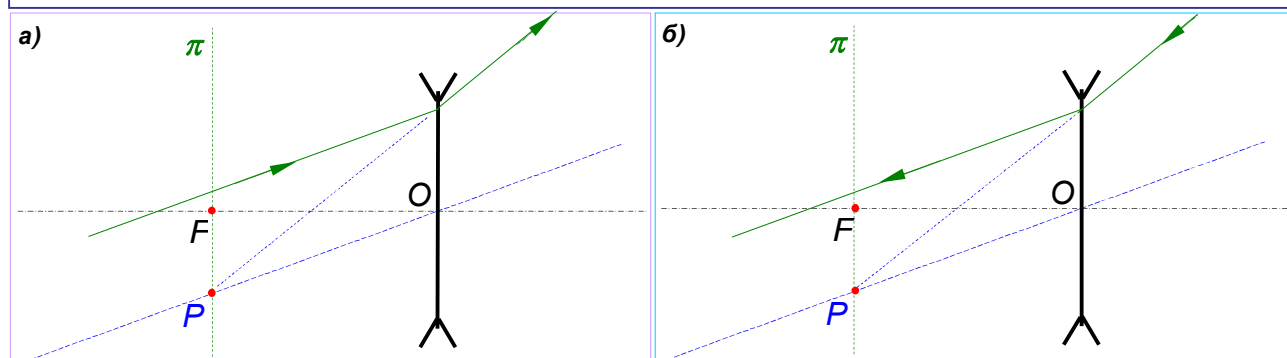


Рис. 73. **Правило 3.** Луч, падающий на линзу наклонно, преломившись, идёт так, что его продолжение в обратную сторону проходит через побочный фокус P параллельной этому лучу побочной оси PO , (а). Луч, направленный на побочный фокус P перед линзой, за ней идёт параллельно побочной оси PO (б).

Луч, направленный на главный фокус перед рассеивающей линзой, преобразуется за ней в луч, параллельный главной оптической оси, *рис.72, б*.

Правило 3. Луч, падающий на рассеивающую линзу наклонно и не направленный в главный фокус F , преломившись, идёт так, что его продолжение в обратную сторону проходит через побочный фокус P параллельной этому лучу побочной оси PO , (а), *рис. 73, а*.

Луч, направленный на побочный фокус P перед линзой, за ней идёт параллельно побочной оси PO , (б), *рис. 73, б*.

8⁰. Пользуясь полученными правилами, можно, не применяя каждый раз законы преломления, строить изображения, даваемые линзами. При этом мы будем пользоваться терминами видимый «предмет» и его «изображение», подразумевая следующее.

Видимый **предмет** мы воспринимаем как совокупность светящихся точек. От этих точек исходят расходящиеся пучки лучей, которые после преломления в линзе либо сами, либо своими продолжениями снова сходятся в определенных точках; их совокупность и образует **изображение** данного предмета.

Чтобы получить **изображение точки** достаточно рассмотреть ход исходящих от точки **двух** лучей до их пересечения (*видимое изображение*) или их продолжений (*изображение мнимое*).

Как вы знаете, мнимое изображение существует лишь в нашем воображении, а действительное изображение можно получить на экране, т. к. его образуют реальные лучи, способные переносить энергию.

Чтобы получить изображение **простейшего предмета** (например, стрелки AB) достаточно построить изображения двух точек.

9⁰. **Изображение точки с помощью собирающей линзы** в двух характерных случаях: 1) точка не лежит на главной оптической оси, *рис. 74*; 2) точка расположена на главной оптической оси, *рис. 75*.

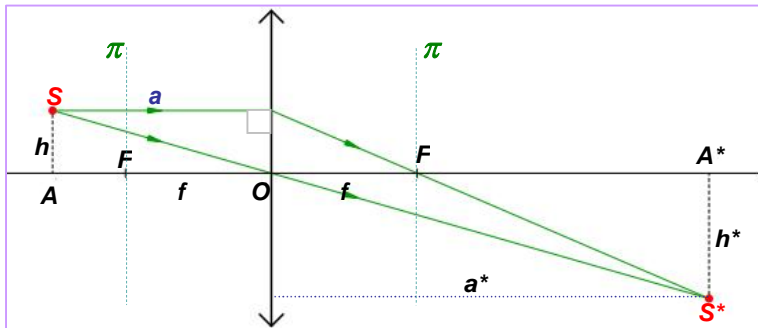


Рис. 74. Случай: $a > f$. Построение изображения точки S , не лежащей на главной оптической оси.
Использованы: **правило 1** и **правило 2**.

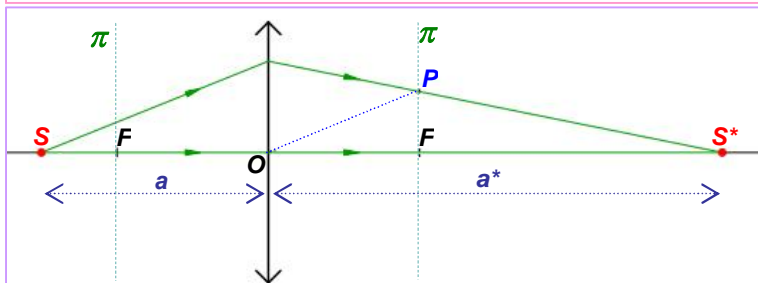


Рис. 75. Случай: $a > f$. Построение изображения точки S , расположенной на главной оптической оси.
Использованы: **правило 1** и **правило 3**.

1) Пусть S – точка, a, h – расстояния точки S до линзы и главной оптической оси соответственно, f – фокусное расстояние линзы; S^* – изображение точки, a^*, h^* – расстояния изображения S^* до линзы и главной оптической оси соответственно.

При построении удобно использовать правила 1 и 2, *рис. 74*.

2). Если точка S лежит на главной оптической оси, удобно использовать правила 1 и 3, *рис. 75*.

10⁰. Выведем две полезные формулы для тонких линз.

Из подобия двух пар прямоугольных треугольников на *рис. 74*, следует:

$$\frac{h}{a} = \frac{h^*}{a^*} \quad \text{и} \quad \frac{h}{f} = \frac{h^*}{a^* - f}.$$

Откуда, после несложных преобразований, получим два уравнения:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a^*} = \frac{1}{f}. \quad [9]$$

и

$$\frac{h^*}{h} = \frac{a^*}{a}$$

Уравнение [9] называется *уравнением тонкой линзы*.

Второе уравнение утверждает, что отношения линейных размеров изображения и предмета h^*/h равно отношению их расстояний от линзы a^*/a . Отношение h^*/h называется *линейным увеличением линзы*. Мы обозначим его буквой K :

$$K = \frac{h^*}{h} \quad [10]$$

Пользуясь уравнением тонкой линзы [9], следует учитывать, что:

$f > 0$, если линза собирающая;

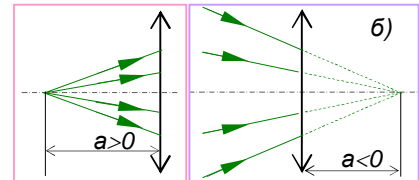
$f < 0$, если линза рассеивающая;

$a^* > 0$, если изображение действительное;

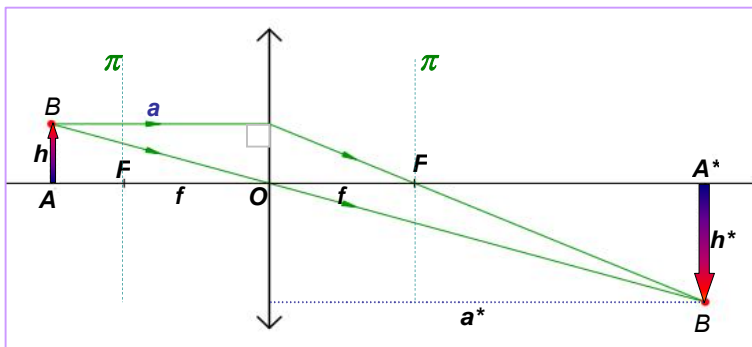
$a^* < 0$, если изображение мнимое;

$a > 0$, если на линзу падает расходящийся пучок лучей, *рис. а)*;

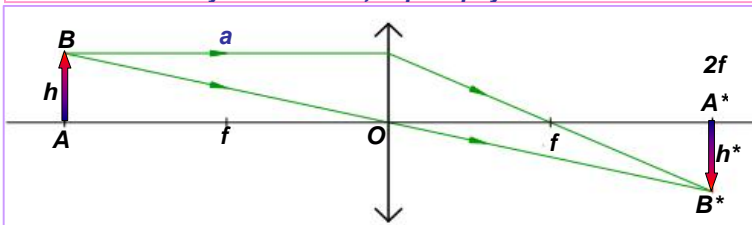
$a < 0$, если на линзу падает сходящийся пучок лучей (например, за собирающей линзой), *рис. б)*.



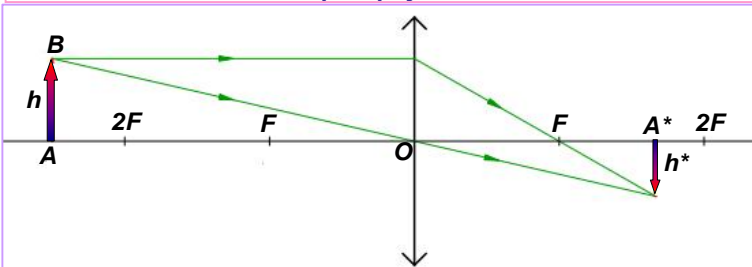
11⁰. Построение изображений в собирающей линзе предмета АВ (изображён в виде стрелки). Рассмотрим три случая $a > f$; $a < f$ и $a = f$.



*Рис. 76. Построение изображение предмета АВ. Случай 1: $a > f$. Вариант $f < a < 2f$ – изображение A^*B^* **действительное, увеличенное, перевёрнутое***



*Рис. 77. Построение изображение предмета АВ. Случай 1: $a > f$. Вариант $a = 2f$ – изображение A^*B^* **действительное, равное, перевёрнутое***



*Рис. 78. Построение изображение предмета АВ. Случай 1: $a > f$. Вариант $a > 2f$ – изображение A^*B^* **действительное, уменьшенное, перевёрнутое.***

Случай 1. $a > f$ – точечный источник света расположен дальше от линзы, чем левая фокальная плоскость.

В этом случае, отдельно выделим три варианта положения предмета **АВ**.

1.1. **Вариант $f < a < 2f$** – изображение предмета **АВ** **увеличенное, перевёрнутое, действительное**, *рис. 76.*

Принцип построения понятен для каждой из точек **А** и **В** из *рис. 74* и *75*

1.2. **Вариант $a = 2f$** – изображение **перевёрнутое, действительное, равное**, *рис. 77.*

Принцип построения тот же. Из формул [9] и [10] следует, что: $a^* = a = 2f$ и $h = h^*$. Следовательно: $K = 1$.

1.3. **Вариант $a > 2f$** – изображение **действительное, уменьшенное, перевёрнутое**, *рис. 78.*

Рассмотренный **случай 1** характерен для многих оптических приборов, в которых получают **изображения**

удалённых объектов: биноклей, фотоаппаратов, кинокамер, телескопов...



12⁰. **Случай 2.** $a < f$ – предмет **AB** расположен между левой фокальной плоскостью и линзой, *рис. 79*.

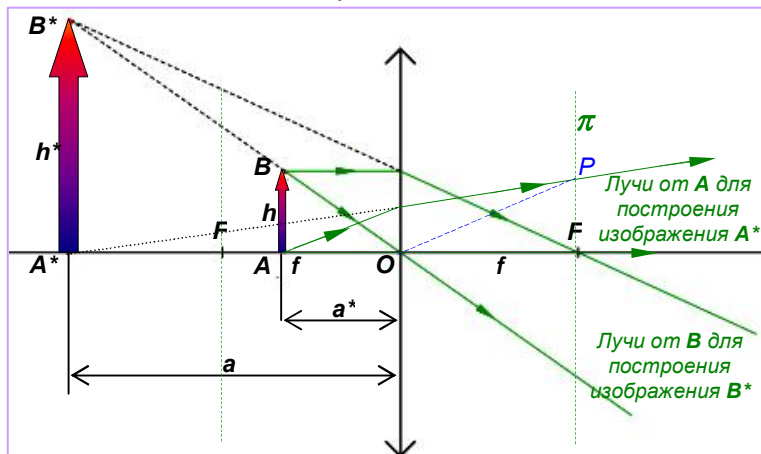


Рис. 79. Построение изображения предмета **AB**. **Случай 2:** ($a < f$).
Изображение **A*B*** **мнимое, увеличенное, прямое.**
 $h^*/h=K$. С этим мы встречаемся при использовании лупы.

Для точки **B** построение выполняется с использованием правил 2 (луч, параллельный главной оптической оси проходит после линзы через правый главный фокус линзы) и 1 (луч проходит через главный оптический центр). Их пересечение слева от линзы даёт мнимое изображение **B*** этой точки.

Изображение точки **A***, лежащей на главной оптической оси – мнимое. Оно получается продолжением двух лучей (идущих от **A** параллельно

побочной и вдоль главной оптических осей) в сторону противоположную их ходу после линзы (влево), *рис. 79*.

С таким использованием линз вы встречаетесь, когда разглядываете в лупу (в увеличительное стекло) мелкий шрифт или мелкие предметы. Увеличенный текст (увеличенные предметы), который вы видите сквозь лупу – это и есть *мнимое изображение* в линзе. Оно не перевернуто – т. е. *прямое*.

На схеме *рис. 78* смотрящий в лупу находится справа.



13⁰. **Случай 3.** $a = f$ – предмет **PF**

расположен точно в фокальной плоскости линзы. Это промежуточный случай по отношению к рассмотренным: лучи из точек предмета **PF** после выхода из линзы (и их продолжения) идут параллельными пучками для каждой из точек. Иными словами – лучи каждой из точек пересекаются в бесконечности, *рис. 68* и *80*. Это означает, что **изображение в данном случае находится в бесконечности**. Или, что тоже самое, изображение отсутствует.

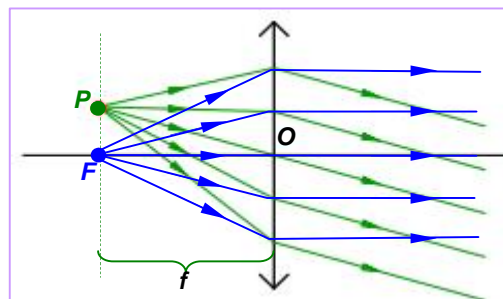


Рис. 80. Изображение точки, расположенной в фокальной плоскости, находится в бесконечности – лучи параллельны.

14⁰. **Изображение точки с помощью рассеивающей линзы** в двух характерных случаях: 1) точка не лежит на главной оптической оси, *рис. 81*; 2) точка расположена на главной оси, *рис. 82* выполняется аналогично тому, как это делается и для собирающей линзы (см. *рис. 74, 75*), но с учётом расходящегося хода лучей за линзой.

Изображение предмета в рассеивающей линзе всегда мнимое, прямое, уменьшенное, *рис. 83*.

Построение точек изображения осуществляется в соответствии с правилами 1÷3 (см. *рис. 66, 72 и 73*)

Характер изображения не зависит от того, на каком расстоянии предмет находится от рассеивающей линзы.

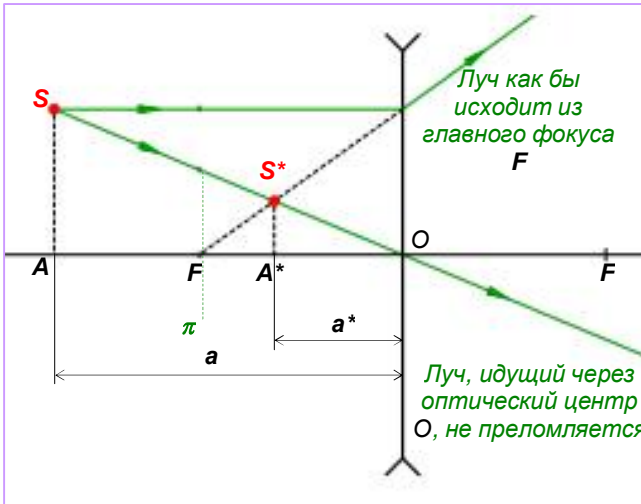


Рис. 81. Построение изображения точки, не лежащей на главной оптической оси с использованием **Правил 1 и 2** для рассеивающей линзы.

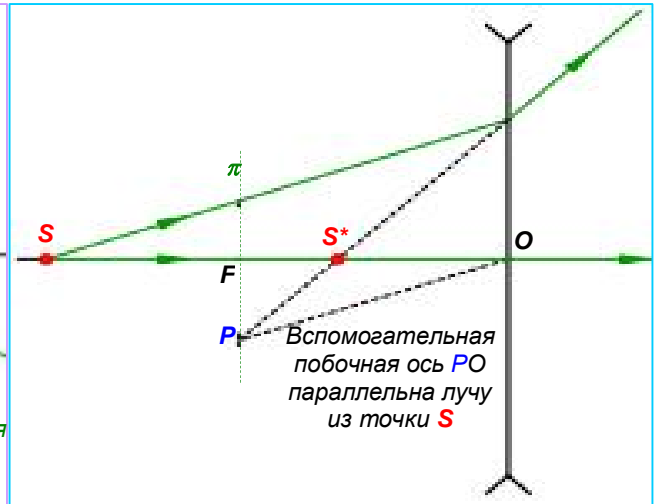


Рис. 82. **Правила 1 и 3.** Изображение точки, расположенной на главной оптической оси, можно найти, проведя вспомогательную побочную ось PO .

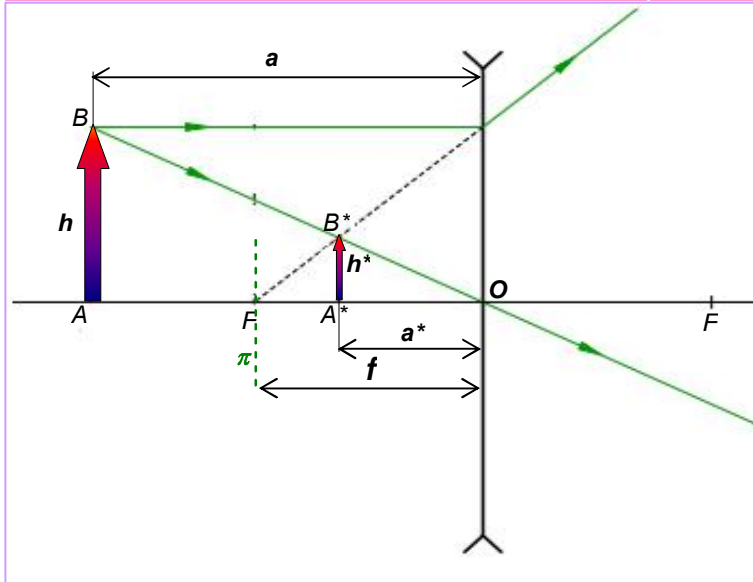
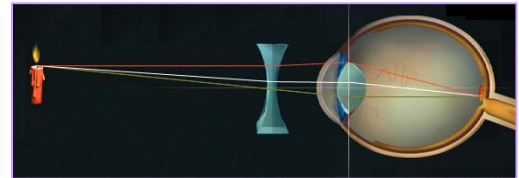


Рис. 83. Построение изображения предмета **AB** в рассеивающей линзе в соответствии с правилами на рис. 66, 72, 73. **Изображение мнимое, прямое, уменьшенное.**

Рассеивающие линзы используются для коррекции близорукости.



Подробнее оптические свойства человеческого глаза будут рассмотрены ниже.



Вопросы

1. От чего зависит характер изображения, даваемого собирающей линзой?
2. Каким является изображение предмета, расположенного за двойным фокусным расстоянием собирающей линзы?
3. Каким является изображение предмета, находящегося между фокусом и двойным фокусным расстоянием собирающей линзы?
4. Каким является изображение предмета, находящегося между собирающей линзой и ее фокусом?
5. Где должен находиться предмет, чтобы его изображение в собирающей линзе было равным самому предмету?
6. Каким является изображение предмета, даваемое рассеивающей линзой?
7. С помощью линзы получено изображение некоторого предмета. В каком случае его можно увидеть на экране — когда это изображение является действительным или когда оно мнимое?

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ЧТО ТАКОЕ МИРАЖИ?

Мираж (фр. *mirage* — букв. *видимость*) — оптическое явление в атмосфере: отражение света границей между резко различными по плотности слоями воздуха. Наблюдатель вместе с отдалённым объектом (или участком неба) видит его мнимое смещённое изображение, *рис. 1*.

Различают миражи нижние, видимые под объектом, верхние — над объектом, и боковые.

Миражи часто наблюдаются в пустынях. Ровная поверхность песка вдалеке становится похожей на поверхность воды (озера, моря), особенно если смотреть вдаль с дюны или холма. На самом деле "водная поверхность" — это не что иное, как отражение неба, *рис. 2*.

Похожая иллюзия поверхности воды возникает в городе в жаркий день над асфальтом, нагретом лучами солнца, *рис. 3*.

Иногда миражи проецируют объекты, находящиеся на большом расстоянии от наблюдателя в увеличенном виде, *рис. 4*.

Так называемые "озерные", или нижние, миражи — самые распространенные. Они возникают над сильно охлажденной или раскаленной поверхностью, например над холодной водой, а также в пустынях и знойных степях.

Раскаленный зноем песок пустыни (асфальта) сильно нагревает прилегающие к нему слои воздуха. Лучи, идущие полого, под малым углом к горизонтальной поверхности — т. е. с *большим углом падения α ($\alpha > \alpha_{пр}$)* испытывают полное отражение от раскаленного слоя воздуха у самой поверхности. Это сопровождается конвективными потоками воздуха.

В данном случае мы встречаемся со сложным явлением: лучи не только искривляются в оптически неоднородном воздухе, но и испытывают явление полного отражения.

Французский ученый Монж, принимавший участие в египетском походе Наполеона, описывает свои впечатления от миража так:

“Когда поверхность земли сильно накалена Солнцем и только-только начинает остывать перед началом сумерек, знакомая местность больше не простирается до горизонта, как днем, а переходит, как кажется, примерно в одном лье в сплошное наводнение. Деревни, расположенные дальше, выглядят, словно острова среди погибшего озера. Под каждой деревней ее опрокинутое изображение, только оно не резкое, мелких деталей не видно, как отражение в воде, колеблемое ветром. Если станешь приближаться к деревне, которая кажется окруженной наводнением, берег мнимой воды все удаляется, водный рукав, отделявший нас от деревни, постепенно суживается, пока не исчезнет совсем, а озеро теперь начинается за этой деревней, отражая в себе селения, расположенные дальше”.



Рис. 1. Миражи возникают, когда свет распространяется в оптически неоднородной среде — в воздухе различной температуры.



Рис. 2. Мираж в пустыне. Ровная поверхность песка похожа на поверхность воды. Но это отражение голубого неба.

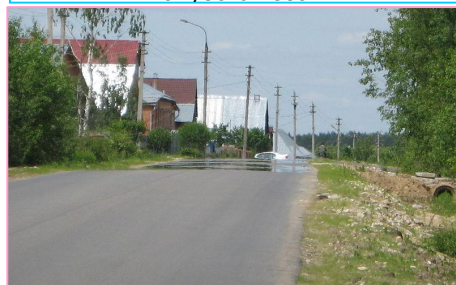


Рис. 3. Раскалённый асфальт создаёт иллюзию водной поверхности.



Рис. 4. Мираж на море: на горизонте иллюзия огромного корабля.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ГЛАЗ И ЗРЕНИЕ

1⁰. Глаз – сложная и совершенная оптическая система, созданная природой. Её изучение важно и интересно для человека. Кроме того оно поможет нам лучше понять принципы работы оптических приборов.

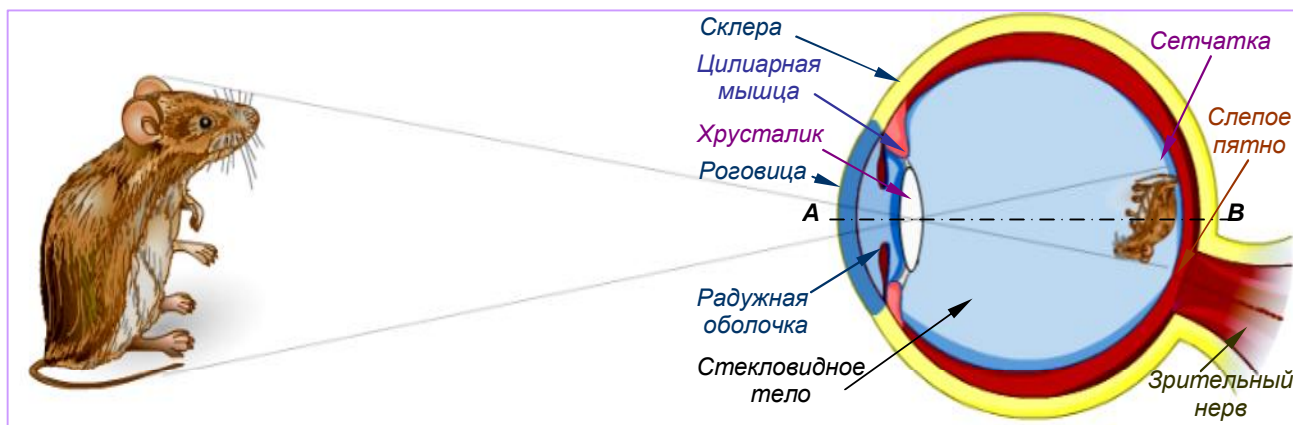
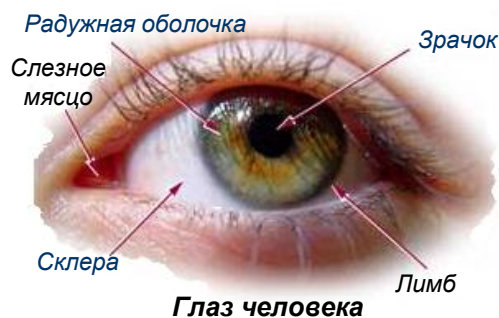


Рис. 1. Строение глаза. Глаз человека состоит из глазного яблока, соединенного зрительным нервом с головным мозгом.

2⁰. На рис. 1 представлена схема устройства глаза человека. **Склера** образует наружную оболочку **глазного яблока** и защищает внутренность глаза, сохраняя его жесткость. На передней поверхности склера переходит в **прозрачную роговицу**, сквозь которую свет проникает в глаз. За роговицей расположена **радужная оболочка** с отверстием – **зрачком**. Диаметр зрачка может изменяться от 2 до 8 мм, уменьшаясь на свету и увеличиваясь в темноте. Радужная оболочка является мышечным кольцом, которое сжимается и растягивается, изменяя размеры зрачка и величину светового потока, попадающего в глаз.

За зрачком расположен **хрусталик**, который представляет собой эластичное, прозрачное тело, имеющее форму двояковыпуклой линзы. Особая **цилиарная мышца**, натягиваясь или расслабляясь, изменяет радиусы кривизны поверхности хрусталика, его оптическую силу и фокусное расстояние. Полость между роговицей и хрусталиком заполнена влагой. За хрусталиком находится **стекловидное тело**. Оптическую систему глаза, аналогичную линзе с оптической силой $D \approx 58,5$ диоптрии, составляют **роговица, стекловидное тело, хрусталик и стекловидное тело**. **Оптический центр** этой системы с главной оптической осью **AB** расположен на расстоянии около 5 мм от роговицы, внутри хрусталика вблизи задней поверхности его.

Всегда действительное обратное изображение предмета, на который аккомодирован глаз, образуется на **сетчатке** – полусфере, состоящей из особых светочувствительных клеток, имеющих форму **колбочек** и **палочек**. Клетки эти расположены на задней поверхности сетчатки, которая лежит на задней части склеры – **глазном дне**.

Нервные клетки сетчатки, объединяясь, образуют **зрительный нерв**, выходящий из глаза в месте, где нет светочувствительных клеток (**слепое пятно**). В центре сетчатки, на оптической оси, находится область наибольшей остроты зрения – **центральная ямка**, в которой сосредоточены колбочки, обеспечивающие глазу

3⁰. Совместное действие палочек и колбочек осуществляет процесс зрительного восприятия предметов. Зрение, осуществляемое палочками, обнаруживает размеры

и форму предмета. Цветовое зрение осуществляется колбочками, если изображение предмета попадает в центральную ямку.

Под действием света в высокочувствительных клетках происходят сложные физико-химические процессы, в результате которых в клетке генерируется нервный импульс, который через зрительный нерв передается в мозг. Так в нашем сознании формируются зрительные образы – мы **видим** окружающий мир.

4⁰. Но если изображение обратное, почему мы видим все предметы такими, как они есть, т. е. неперевернутыми? Дело в том, что процесс зрения непрерывно корректируется мозгом, получающим информацию не только через глаза, но и через другие органы чувств.

В 1896 г. американский психолог Дж. Стреттон поставил на себе эксперимент. Он надел специальные очки, благодаря которым на сетчатке глаза изображения окружающих предметов оказывались не обратными, а прямыми. После этого мир для него перевернулся. Все предметы он стал видеть вверх ногами. У ученого появились симптомы морской болезни. В течение трех дней он ощущал тошноту. Однако на четвертые сутки организм стал приходить в норму, а на пятый день Стреттон стал чувствовать себя так же, как и до эксперимента. Мозг ученого освоился с новыми условиями работы, и все предметы он снова стал видеть прямыми.

Но, когда он снял очки, все опять перевернулось. Однако уже через полтора часа зрение восстановилось, и он снова стал видеть нормально.

Установлено, что такая приспособляемость наблюдается лишь у человека. Например, у обезьян такие эксперименты вызывают очень серьезные расстройства.

5⁰. Для создания на сетчатке четкого изображения предметов, удаленных от глаза на различные расстояния, фокусное расстояние оптической системы в глазу должно изменяться. Это достигается изменением радиусов кривизны поверхности хрусталика. Свойство глаза приспособляться к расстоянию, на котором находятся рассматриваемые предметы, называется **аккомодацией**. Аккомодация происходит произвольно с помощью сокращения или растяжения цилиарной мышцы.

Дальней точкой (аккомодации) называется точка, которую видит глаз при расслабленной цилиарной мышце. Точка, резко видимая глазом при наибольшем напряжении мышцы, называется **ближней точкой** (аккомодации), *рис. 2*.

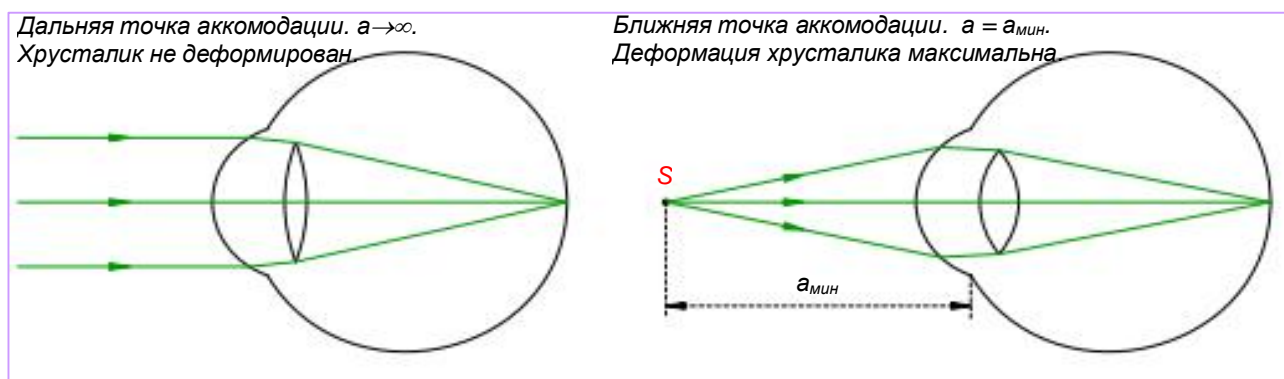


Рис. 2. Дальняя и ближняя точки аккомодации глаза человека. Оптическая система глаза фокусирует изображение на сетчатке. Это происходит подсознательно.

Для нормального глаза дальняя точка находится в бесконечности, а ближняя — на расстоянии $a_{\min} = 15 \div 20$ см.

6⁰. Хотя глаз и не представляет собой тонкую линзу, в нем можно найти точку, через которую лучи проходят практически без преломления, т. е. точку, играющую роль **оптического центра**. Расстояние от оптического центра (который находится вблизи задней поверхности хрусталика) до сетчатой оболочки, называемое **глубиной глаза** и составляет для нормального глаза 15 мм. Для чёткого видения предмета на этом расстоянии и должна происходить фокусировка изображения.

Ввиду малости этого расстояния, предметы, рассматриваемые глазом, всегда находятся за двойным фокусным расстоянием оптической системы глаза. Зная положение оптического центра, можно легко построить изображение какого-либо предмета на сетчатой оболочке глаза. Изображение всегда **действительное, уменьшенное и обратное** (см. §67, *рис. 78*, случай для собирающей линзы, когда $a > 2f$).

7°. Сетчатая оболочка состоит из отдельных светочувствительных элементов. Поэтому две точки объекта, расположенные настолько близко друг к другу, что их изображения на сетчатке попадают на один и тот же элемент, воспринимаются глазом как одна точка.

Две точки изображения предмета считаются видимыми (разрешенными), если они попадают на две разные светочувствительные клетки на сетчатке и воспринимаются глазом раздельно.

8°. Угол θ под которым виден предмет **AB** из оптического центра глаза **O**, называется **углом зрения**, *рис. 3*.

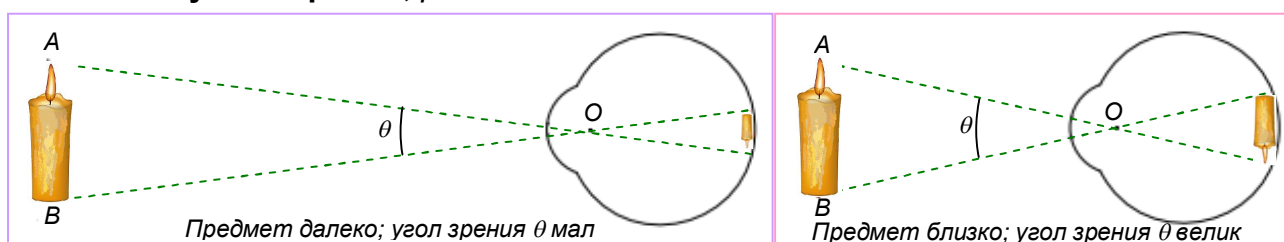


Рис. 3. Угол зрения мал, если предмет далеко. Размер его изображения на сетчатке тоже мал. Поэтому рассмотреть предмет трудно. Угол зрения увеличивается при приближении предмета. Увеличивается и изображение на сетчатке. Рассмотреть предмет в деталях становится легко.

Разрешающая способность глаза оценивается по минимальному углу зрения $\theta_{\text{мин}}$, под которым две точки предмета видны раздельно.

Минимальный угол зрения, под которым две светящиеся точки или две черные точки на белом фоне воспринимаются глазом еще раздельно, называют **предельным углом разрешения глаза**. Он составляет приблизительно одну минуту ($1' = 1/60$ градуса).

Нормальный глаз при хорошем освещении плохо распознает детали предмета, который виден под углом зрения менее одной минуты. Одна минута — это угол, под которым виден отрезок длиной ≈ 30 см на расстоянии 1 км от глаза.

При плохом освещении (в сумерках) минимальный угол разрешения повышается и может дойти до 1° .

Приближая предмет к глазу, мы увеличиваем угол зрения и, следовательно, получаем возможность лучше различать мелкие детали. Однако очень близко к глазу приблизить предмет мы не можем, так как способность глаза к аккомодации ограничена.

Для нормального глаза наиболее благоприятным для рассматривания предмета оказывается расстояние ≈ 25 см, при котором глаз достаточно хорошо различает детали без чрезмерного утомления. Это расстояние $D = 25$ см называется **расстоянием наилучшего зрения**. Оно является оптимальным при чтении и письме для человека с нормальным зрением.

9°. Оценим размеры изображения на сетчатке глаза мелкого предмета (размер его мал по сравнению с расстоянием до глаза $h \ll a$) при рассмотрении его с расстояния наилучшего зрения ($D = 25$ см). Известно, что фокусное расстояние для здорового глаза $f \approx 15$ мм. Значит на *рис. 4* величина $a^* \approx 15$ мм.

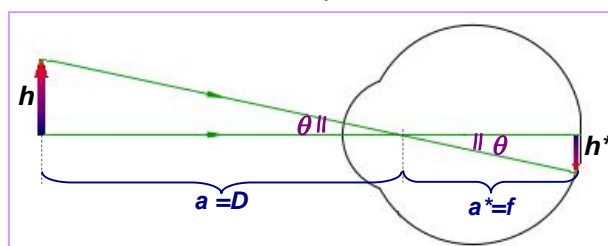


Рис. 4. Изображение мелкого предмета на сетчатке невооружённого глаза.

Из рисунка видно, что $h^*/h = a^*/a \approx 15/250 = 0,06$.

Таким образом, при рассмотрении мелкого предмета невооружённым глазом **изображение его на сетчатке приблизительно в 16,6 раз меньше самого предмета.**

10⁰. Однако расстояние наилучшего зрения у глаз различных людей различно. У близорукого глаза это расстояние меньше 25 см. Поэтому близорукие люди, помещая рассматриваемый предмет ближе к глазу, чем люди с нормальным зрением или дальнозоркие, видят его под большим углом зрения и могут лучше различать мелкие детали.

Рассмотрим подробнее, что такое **близорукость и дальнозоркость**, *рис. 5*.

У человека с хорошим, нормальным зрением глаз в ненапряженном состоянии собирает параллельные лучи в точке, лежащей на сетчатке глаза, *рис. 5, слева*. Иначе обстоит дело у людей, страдающих близорукостью и дальнозоркостью.

Близорукость — это недостаток зрения, при котором параллельные лучи после преломления в глазу собираются не на сетчатке, а ближе к хрусталику, *рис. 5, в центре*. Изображения удаленных предметов оказываются на сетчатке нечеткими, расплывчатыми. Чтобы получилось резкое изображение, рассматриваемый предмет необходимо приблизить к глазу.

Расстояние наилучшего зрения для близорукого глаза меньше 25 см.

Близорукость может быть обусловлена двумя причинами: 1) избыточной оптической силой глаза; 2) удлинением глаза вдоль его оптической оси. Развивается близорукость обычно в школьные годы и связана, как правило, с продолжительным чтением или письмом, особенно при недостаточном освещении и неправильном расположении источника света.

Дальнозоркость — это недостаток зрения, при котором параллельные лучи после преломления в глазу сходятся под таким углом, что фокус оказывается расположенным не на сетчатке, а за ней, *рис. 5, справа*. Изображения удаленных предметов на сетчатке при этом снова оказываются нечеткими, расплывчатыми.

Поскольку дальнозоркий глаз не способен сфокусировать на сетчатке даже параллельные лучи, то еще хуже он собирает расходящиеся лучи, идущие от близкорасположенных предметов. Поэтому дальнозоркие люди плохо видят и вдали, и вблизи.

Расстояние наилучшего зрения для дальнозоркого глаза больше 25 см.

Этим и объясняется название «дальнозоркость».

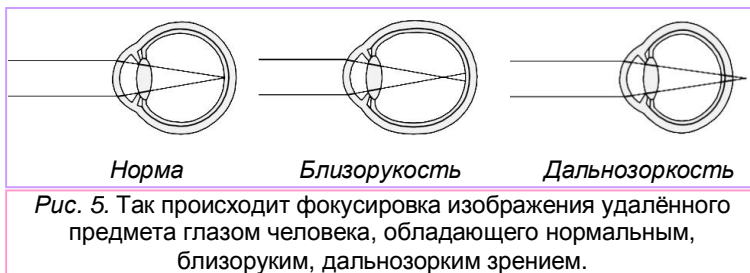
Дальнозоркость может быть обусловлена либо понижением оптической силы глаза, либо уменьшением длины глаза вдоль его оптической оси.

Дальнозоркостью страдает большинство новорожденных, однако по мере роста ребенка глазное яблоко несколько увеличивается, и этот недостаток зрения исчезает. В пожилом возрасте у людей может развиваться так называемая старческая дальнозоркость. Объясняется это тем, что мышцы, сжимающие хрусталик, с возрастом ослабевают, и способность аккомодации уменьшается. Этому же содействует и уплотнение хрусталика, постепенно теряющего способность сжиматься.

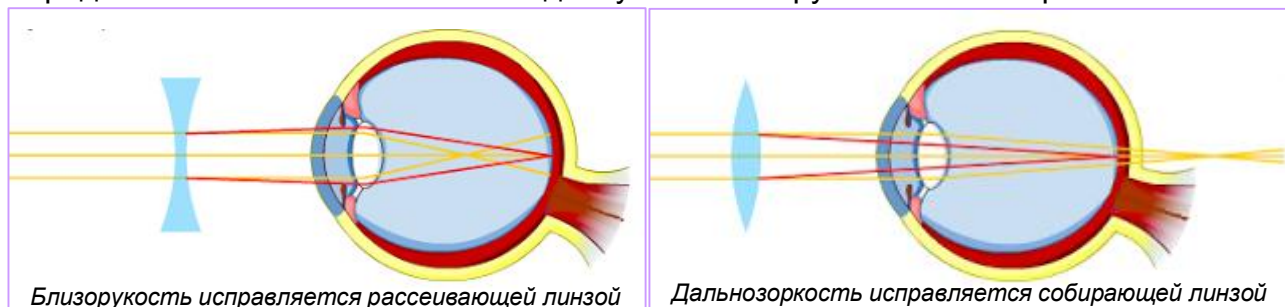
11⁰. **Близорукость и дальнозоркость исправляют (компенсируют) применением линз.**

Первые очки появились в конце XIII в. Их изобретение стало великим благом для людей с недостатками зрения.

Какие же линзы следует применять для исправления близорукости и дальнозоркости?



При близорукости изображение удаленного предмета получается внутри глаза перед сетчаткой. Чтобы оно отодвинулось от хрусталика и переместилось на



Близорукость исправляется рассеивающей линзой *Дальнозоркость исправляется собирающей линзой*
 Рис. 6. Жёлтым цветом показан ход лучей при близорукости (слева) и при дальнозоркости (справа). При близорукости фокусировка лучей происходит ближе, а при дальнозоркости – дальше сетчатки. Рассеивающая линза при близорукости, а собирающая – при дальнозоркости позволяют (при правильном выборе её фокусного расстояния) добиться фокусировки лучей на сетчатке глаза (лучи красного цвета). В этом и состоит исправление данных недостатков зрения с помощью очков или глазных линз.

сетчатку, следует применять рассеивающие (вогнутые) линзы, *рис. 6, слева*. Такие линзы имеют отрицательную оптическую силу. Поэтому если врач-окулист выписывает пациенту очки, оптическая сила которых равна, например, - 2 дптр, то это означает, что тот близорук.

При дальнозоркости все обстоит иначе. Теперь изображение оказывается за сетчаткой, и для его перемещения на нее применяют очки с собирающими (выпуклыми) линзами, *рис. 6, справа*. Оптическая сила таких линз положительна.

Поэтому выписывание очков, оптическая сила которых равна, например, +3 дптр, означает, что пациент дальнозорок.

12⁰. Любопытно понять, что даёт зрение двумя глазами?

Во-первых, если мы видим предмет двумя глазами, на сетчатках правого и левого глаза получают отличающиеся друг от друга изображения, соответствующие взгляду на предмет как бы справа и слева, *рис. 7*. Чем ближе предмет, тем заметнее это различие. Оно и создает впечатление разницы в расстояниях. Эта способность зрения позволяет различать, какой из предметов находится ближе, какой дальше от нас, какую он имеет форму и объём (**стереоскопическое свойство зрения**¹).



Рис. 7. Эти две фотографии галереи сделаны со сдвигом фотокамеры на 7,5 см. Приблизительно так, по-разному видят галерею наши левый и правый глаз.

Во-вторых, благодаря наличию двух глаз *увеличивается поле зрения*. Поле зрения человека изображено на *рис. 8, а*. Для сравнения рядом с ним показаны поля зрения зайца (*рис. 8, б*) и лошади (*рис. 8, в*).

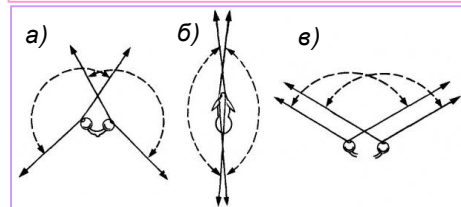


Рис. 8. Поле зрения: а – человека, б – зайца; в – лошади.

Обратите внимание, что *перекрывание* полей зрения правого и левого глаз имеет место только в небольшой области, впереди. Только в этой области зрение является стереоскопическим. Сзади же, вне полей зрения обоих глаз находится *слепая зона*.

Слепая зона очень мала у кролика. Поэтому к кролику очень трудно подкрасться незамеченным. У хищников, напротив, обычно велика область стереоскопического зрения и слепая зона.

13⁰. Английский писатель Герберт Уэллс (1866-1946) в своем фантастическом романе «Человек-невидимка» положительно отвечает на любопытный вопрос:

¹ от греч. stereós — объёмный, пространственный. Стереоскопическое зрение иногда называют бинокулярным (от лат. bini — «два» и лат. oculus — «глаз»).

возможно ли самому быть невидимым, но видеть окружающий мир. Прав ли был писатель? С физической точки зрения человек окажется невидимым, если его вещество станет прозрачным и обладающим той же оптической плотностью, что и окружающий воздух. Тогда отражения и преломления света на границе человеческого тела с воздухом не будет, и он превратится в невидимку.

Так, например, толченное стекло, имеющее на воздухе вид белого порошка, тут же исчезает из виду, когда его помещают в воду — среду, обладающую примерно той же оптической плотностью, что и стекло. В 1911 г немецкий ученый Шпальтегольц пропитал препарат мертвой ткани животного специально приготовленной жидкостью, после чего поместил его в сосуд с такой же жидкостью. Препарат стал невидимым!

Однако человек-невидимка должен быть невидимым на воздухе, а не в специально приготовленном растворе. А этого достигнуть не удастся: оптическая плотность воздуха почти та же, что и вакуума.

Но допустим, что человеку все-таки удастся стать прозрачным. Люди перестанут его видеть, если он будет ходить голым: одежда будет видимой и выдаст его. Но даже в этом случае он сам не сможет видеть окружающий мир. Ведь все его части, в том числе и глаза, перестанут преломлять световые лучи, и, следовательно, никакого изображения на сетчатке глаза возникать не будет. *Человек-невидимка должен быть слепым!*



Вопросы

1. Как устроен глаз человека? Какие его части образуют оптическую систему?
2. Охарактеризуйте изображение, возникающее на сетчатке глаза.
3. Как передается изображение предмета в мозг? Почему мы видим предметы прямыми, а не перевернутыми?
4. Почему, переводя взгляд с близкого предмета на удаленный, мы продолжаем видеть его четкий образ? Что такое аккомодация?
5. Чему равно расстояние наилучшего зрения?
6. Что такое близорукость? Какими причинами она обусловлена? Какие линзы исправляют близорукость?
7. Что такое дальнозоркость? Какими причинами она обусловлена? Какие линзы исправляют дальнозоркость?
8. Как меняется расстояние наилучшего зрения у близоруких и дальнозорких людей?
9. Имеются очки: +2 дптр, – 0,25 дптр, – 4 дптр, + 1,5 дптр. Какие недостатки зрения исправляют эти очки?
10. Какое преимущество дает зрение двумя глазами? Что такое стереоскопическое зрение?
11. Чем отличается поле зрения у зайца и льва? Что такое поле зрения?
12. Почему человек-невидимка должен быть слепым?
13. Каковы размеры мелкого предмета на сетчатке нормального глаза?
14. Что такое угол зрения? Что такое предельный угол разрешения глаза?



ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Рассмотренные законы образования изображений в оптических системах служат основой для создания разнообразных оптических приборов. В одних приборах изображение получается на экране (обычном или светочувствительном), который установлен в плоскости изображения. Другие приборы предназначены для работы совместно с глазом человека и увеличивают его возможности.

К приборам первого типа относятся фотоаппараты, проекционные аппараты.

К приборам второго типа относятся лупа, микроскоп, телескоп, очки, бинокли.

Рассмотрим несколько примеров оптических приборов того и другого типа.

1⁰. **Фотоаппарат** – устройство для получения и фиксации неподвижных изображений объектов с помощью света.

Первым аппаратом, с помощью которого удалось получить изображения различных объектов, была уже известная вам, но несколько усовершенствованная камера обскура (см. конец §62).

Если такая светонепроницаемая камера имеет входное отверстие около миллиметра, с её помощью можно получить исключительно резкие фотографии неподвижных объектов с минимальными искажениями. Каждый точечный источник света фотографируемого объекта образует на плёнке пятно по форме входного отверстия. Рисунок изображения состоит из множества таких пятен. При маленьком отверстии никакой наводки на резкость не требуется. Благодаря такой прямолинейной геометрии световых лучей все предметы изображаются в фокусе и без искажений, *рис. 1*.

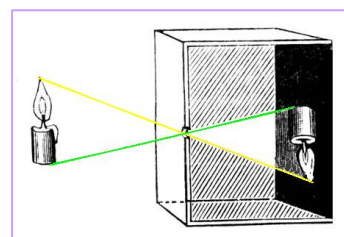


Рис. 1. Ход лучей при фотографировании.

Можно подумать, что для получения более чёткого изображения нужно просто уменьшать размер входного отверстия камеры. Однако это целесообразно лишь до определённого предела.

Конечно, если отверстие имеет диаметр 1 см, изображение представляет собой совокупность сантиметровых пятен, наложенных друг на друга. Но даже в этом случае фотография передаёт некоторое сходство. Однако, чрезмерное уменьшение входного отверстия приводит к увеличению расплывчатости образуемого рисунка пятен. Кроме того, уменьшается световая энергия лучей, достигающих плёнку: уменьшение диаметра в 2 раза уменьшает световой поток в 4 раза. Время экспозиции также приходится увеличивать в 4 раза. Для практической фотографии необходимо увеличивать световой поток на плёнку, не увеличивая размеры образуемых рисунков пятен.

Эта проблема была решена, когда малое входное отверстие было заменено **объективом**, содержащим собирающую линзу (систему линз). Ведь, как вам известно, любой удалённый источник света можно сфокусировать на экран (плёнку), помещённый в главную фокальную плоскость линзы. Более того, весь падающий на линзу свет от каждой удалённой точки фокусируется в определённом месте изображения. Объектив позволяет многократно увеличить диаметр входного отверстия, сохранив маленький размер точек, образующих изображение.

Однако и в такой схеме есть недостатки. Только объекты, находящиеся на одном и том же расстоянии от фотографируемого объектива образуют чёткие изображения. Если плёнку поместить в фокальную плоскость объектива, четко будут изображаться бесконечно удалённые объекты.

К счастью, фокусное расстояние обычного объектива составляет 4-5 см, так что объект удалённый хотя бы на 2 м, будет получаться почти в фокусе, как можно видеть из основной формулы линзы [9].

Например, в случае линзы с фокусным расстоянием $f=5$ см, изображение объекта, находящегося на расстоянии $a=200$ см, сместится от фокальной плоскости на 0,13 см. Это следует из уравнения [9], которое в этом случае примет вид: $\frac{1}{200} + \frac{1}{a^*} = \frac{1}{5}$. Откуда $a^* \approx 5,13$ см. Будет ли в этом случае изображение чётким, зависит от ряда других условий.

Чем больше диаметр объектива, тем больше света он может сфокусировать на каждую точку плёнки. Однако простая собирающая линза большого диаметра приводит к искажениям, особенно для лучей, далёких от главной оптической оси. Поэтому хороший фотообъектив представляет собой сложную систему линз. Но и в этом случае с увеличением диаметра объектива ужесточаются требования к наводке на резкость. Если надо получить большую *глубину резкости* – чтобы сразу многие объекты дали чёткое изображение на плёнке, следует брать объектив небольшого диаметра, наведённый на удалённые объекты.

Отверстие объектива можно уменьшить, закрывая **диафрагму**, состоящую из металлических лепестков. Для этого достаточно повернуть соответствующее кольцо на объективе, *рис. 2*.



Рис. 2. Объектив с регулируемой диафрагмой. Стрелки показывают направление поворота кольца диафрагмы.

Объектив – важнейший узел фотоаппарата. Его качество оценивается величиной d/f (d – диаметр; f – фокусное расстояние объектива). Величина $(d/f)^2$ называется **светосилой** объектива. Чем больше эта величина, тем больше освещённость изображения и меньше время экспозиции.

Из истории фотографии. В 30-х гг. XIX в. французский художник и изобретатель Луи Дагер поместил в отверстие светонепроницаемой камеры обскура линзу (это был первый **объектив**), а туда, где находился экран с изображением, светочувствительную пластинку, покрытую йодистым серебром, *рис. 3*. Под воздействием света (в течение некоторого времени τ , называемого временем **экспозиции**) в светочувствительном слое пластинки получалось скрытое изображение. Полученный таким образом снимок далее обрабатывался специальными реактивами (проявлялся, фиксировался и промывался водой) для получения видимого изображения с различным почернением.

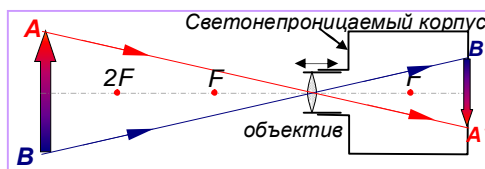


Рис. 3. Оптическая схема фотоаппарата и ход лучей при фотографировании.

Замена малого входного отверстия камеры обскуры объективом (который в простейшем случае является собирающей линзой большего диаметра d) сделала изображение более ярким, и позволило уменьшить время экспозиции τ при получении снимка. Время экспозиции определяется **затвором** – устройством, открывающим световой поток из объектива на заданный промежуток времени τ . В первых фотоаппаратах время экспозиции измерялось обычными часами, а роль затвора выполняла крышка, закрывавшая объектив. Позднее был изобретён автоматический затвор.

При фотографировании объектов, находящихся на различных расстояниях для получения чёткого изображения приходилось регулировать расстояние между объективом и плёнкой перемещением объектива – «наводить на резкость». На *рис. 3* эта возможность показана двойной стрелкой. В современных аппаратах всё это делается автоматически.

Более полутора веков фотография не обходилась без химической обработки отснятых пластинок и плёнок. Современные цифровые фотоаппараты (*рис. 4*) лишены этого недостатка. Действительное уменьшенное



Рис. 4. Современный цифровой фотоаппарат (внешний вид)

перевернутое изображение в них формируется на светочувствительной матрице – полупроводниковом приборе, который преобразует свет, поступивший из объектива через затвор, в серию электрических импульсов. Эти импульсы хранятся в электронной памяти аппарата.

Устройство современных фотоаппаратов весьма сложно. Обычно, кроме основной оптической системы (*объектив – затвор – светочувствительный экран*), в них имеется отдельная оптическая система видоискателя, *рис. 5*.

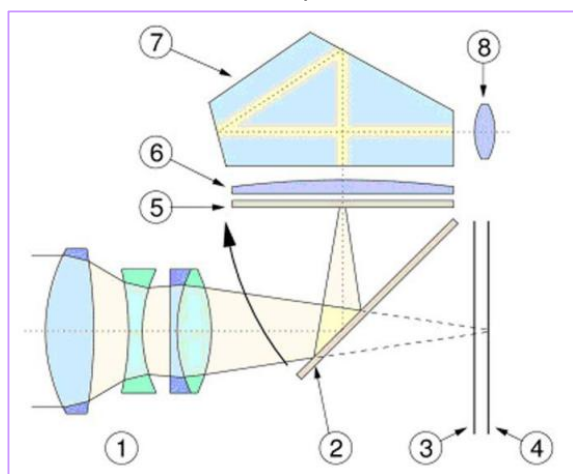


Рис. 5. Схема современного зеркального фотоаппарата:
 1 - объектив представляет собой сложную систему линз, фокусирующих изображение на светочувствительном сенсоре – матрице 4;
 2 – подвижное зеркало видоискателя;
 3 – затвор, пропускающий свет на светочувствительный элемент (экран) на заранее заданный промежуток времени τ ,
 4 – полупроводниковый прибор (светочувствительный экран), преобразующий свет, поступивший из объектива через затвор, в серию электрических импульсов;
 5 – экран видоискателя;
 6 – линза видоискателя, формирующая изображение в видоискателе;
 7 – призма, изменяющая направление хода световых лучей и направляющая их в видоискатель;
 8 – окуляр видоискателя, формирующий изображение на видоискателе.

Замечание. Обратите внимание, что в некоторых отношениях фотоаппарат и глаз (см. Приложение 2) очень похожи. У них есть линза впереди и светочувствительный экран вблизи фокальной плоскости. Глаз природа устроила очень изощрённо. У фотоаппарата наводка на резкость достигается перемещением объектива вперёд или назад по отношению к светочувствительному экрану, а у глаза хрусталик находится в фиксированном положении, но его оптическая сила может меняться за счёт изменения кривизны. Как и объектив фотоаппарата, хрусталик может диафрагмироваться радужной оболочкой.

2⁰. **Проекционные аппараты** (проектор от лат. projector – выбрасывающий вперед) предназначены для получения на удалённом экране действительных увеличенных изображений объектов.

В данном случае, кроме получения чёткого изображения, необходимо послать на экран тем больше световой энергии, чем больше экран. В противном случае изображение будет слишком тёмным. Поэтому задача заключается в том, чтобы пропустить как можно больше света от объекта, изображение которого надо получить, на экран.

На *рис. 6* показана схема устройства проектора. Короткофокусная система линз – конденсор *K* и рефлектор (вогнутое зеркало) *P* направляют свет от источника *S* к диапозитиву, изображение которого надо получить. Объектив *O* – система линз, действующая как одна собирающая линза, – даёт на экране увеличенное изображение *A*B** хорошо освещённого диапозитива *AB*, располагающегося вблизи передней фокальной плоскости объектива.

Можно выделить следующие разновидности проекторов.

Проекционные аппараты для прозрачных объектов (диафильмов, диапозитивов) называются **диапроекторами**. В частности, сюда относятся и кинопроекторы.

Проекционные аппараты для непрозрачных объектов (рисунков, фотографий) – **эпипроекторами**.

Проекционные аппараты для прозрачных и непрозрачных объектов, называются **эпидиаскопами**, *рис. 7*.

Понятно, что чем большего размера надо получить на экране изображение *A*B**, тем более интенсивным источником света *S*

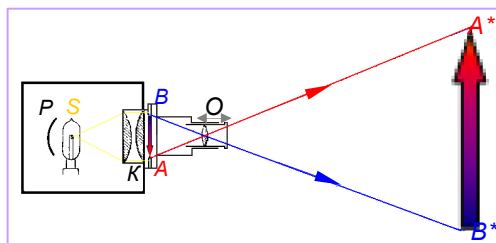


Рис. 6. Схема диапроектора.
S – источник света; *P* – рефлектор; *K* – конденсор; *O* – объектив; *AB* и *A*B** – диапозитив и его изображение на экране.

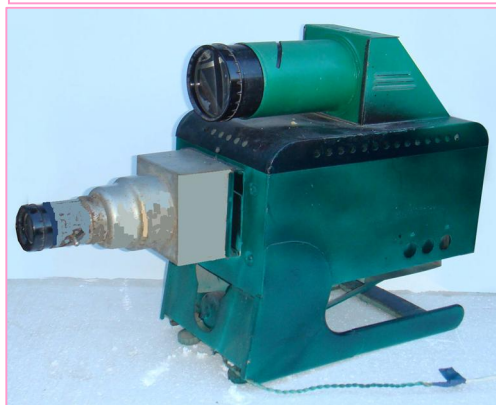


Рис. 7. Внешний вид эпидиаскопа.

следует снабжать проекционный аппарат. Необходимая мощность источника света увеличивается пропорционально площади изображения, т. е. пропорционально квадрату линейного увеличения изображения A^*B^*/AB . Кроме того, используется объектив возможно большей светосилы.



Рис. 8. Волшебный фонарь. До появления электрических ламп в таких проекторах использовались свечи и лампада. Сверху видна труба вентиляции.

Считается, что первый проектор изобрел немецкий физик и математик Афанасий Кирхер в 1640 году, назвав его «волшебный фонарь». Аппарат, в котором источником света служила свеча, позволял создавать на экране теневые проекции изображения людей, животных или предметов, вырезанных из картона.

До изобретения мощных источников света с небольшим выделением тепла перегрев проекторов требовал использования специальных систем вентиляции и ограничивал размер экрана, на котором получалось изображение, рис. 8.

Современные проекционные аппараты весьма разнообразны. Они могут быть весьма компактны, рис.9. Но могут быть устройствами, которые подключаются к компьютеру. Многие из них позволяют проецировать на большой экран изображение с экрана монитора.



Рис. 9. Внешний вид современного диапроектора и эпидиаскопа.

3⁰. **Лупа** – это оптический прибор, позволяющий простейшим образом увеличить угол зрения θ при рассмотрении данного предмета.

Рассмотрим, как это происходит.

Невооруженный нормальный глаз видит предмет $h=AB$ под углом зрения θ_0 таким, что $tg\theta_0 = h/D$ ($D \approx 25$ см — расстояние наилучшего зрения), рис. 10. Если предмет мал, угол зрения тоже мал и детали его неразличимы. В этих случаях используют лупу.

Лупа представляет собой короткофокусную собирающую линзу (или систему линз), которую помещают для рассматривания предмета $AB=h$ так, чтобы предмет был несколько ближе главного фокуса F линзы, рис. 11 (см. также §67; п. 12⁰).

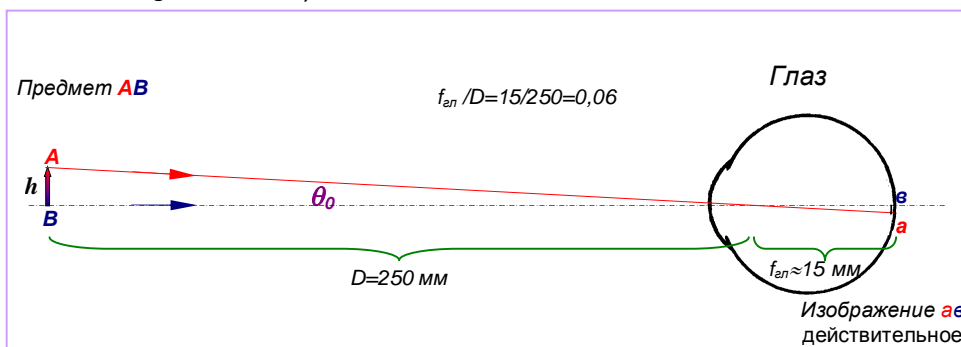


Рис. 10. Так невооружённый глаз видит предмет AB на расстоянии наилучшего зрения. Изображение его на сетчатке $ab \approx 0,06 \cdot AB$; $tg\theta_0 = AB/D$. Угол θ_0 весьма мал.

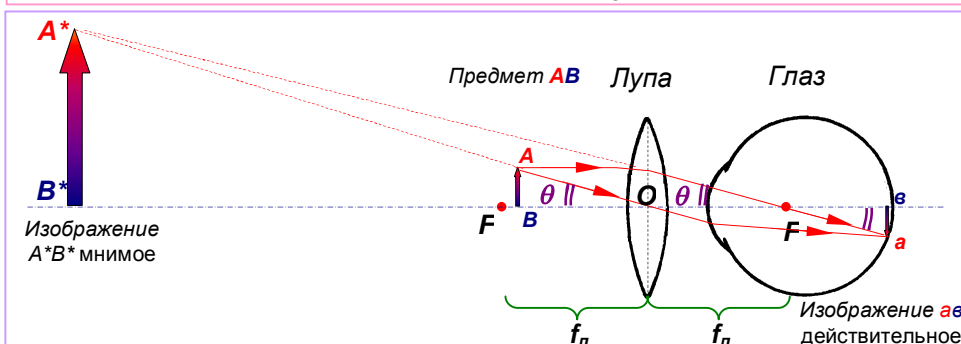


Рис. 11. Изображения предмета и ход лучей в системе «предмет AB – лупа – глаз». Изображение ab на сетчатке такое, как если бы глаз видел предмет величиной A^*B^* .

Глаз, вооруженный лупой, видит предмет под углом θ , тангенс которого равен $tg\theta = h/f_n$, где f_n — фокусное расстояние линзы. На *рис. 11* показан ход лучей в лупе. Изображение av , предмета на сетчатке глаза оказывается таким же, как если бы рассматривался предмет имел величину A^*B^* . Но на самом деле A^*B^* является лишь мнимым изображением в лупе предмета $AB = h$.

Конструкция лупы зависит от её назначения. Внешний вид лупы ручной и лупы на штативе показан на *рис. 12*. Основными характеристиками лупы являются её диаметр и фокусное расстояние.

Угловым увеличением оптического прибора называется величина

$$\gamma = \frac{tg\theta}{tg\theta_0} \quad [11]$$

Подставляя значения тангенсов (см. *рис. 10* и *рис. 11*), получим **угловое увеличение лупы**:

$$\gamma = \frac{tg\theta}{tg\theta_0} = \frac{D}{f_n} \quad [12]$$

Из этой формулы видно, что увеличение лупы можно увеличить, уменьшая её фокусное расстояние, т. е. увеличивая кривизну линзы. Но при этом изображение становится всё более искажённым. Поэтому реальный предел увеличения лупы ограничен значением ≈ 50 .

4⁰. **Микроскопом** называется прибор, позволяющий получать значительные угловые увеличения близко расположенных мелких предметов.

В простейшем случае он представляет собой комбинацию двух собирающих линз (двух систем таких линз) — **объектива** и **окуляра**. Объектив обращён к объекту (предмету), а окуляр к глазу (оку).

Рассматривая предмет $AB=h$ в микроскоп, его располагают между фокусом и двойным фокусом объектива, *рис. 13-14*. При этом объектив даёт увеличенное действительное перевернутое изображение $A_1B_1=H$ предмета вблизи передней

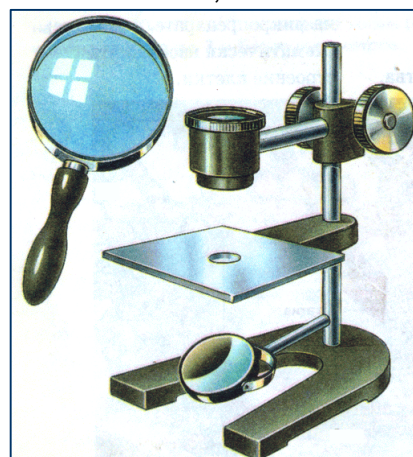


Рис. 12. Внешний вид лупы ручной (слева сверху) и лупы на штативе.

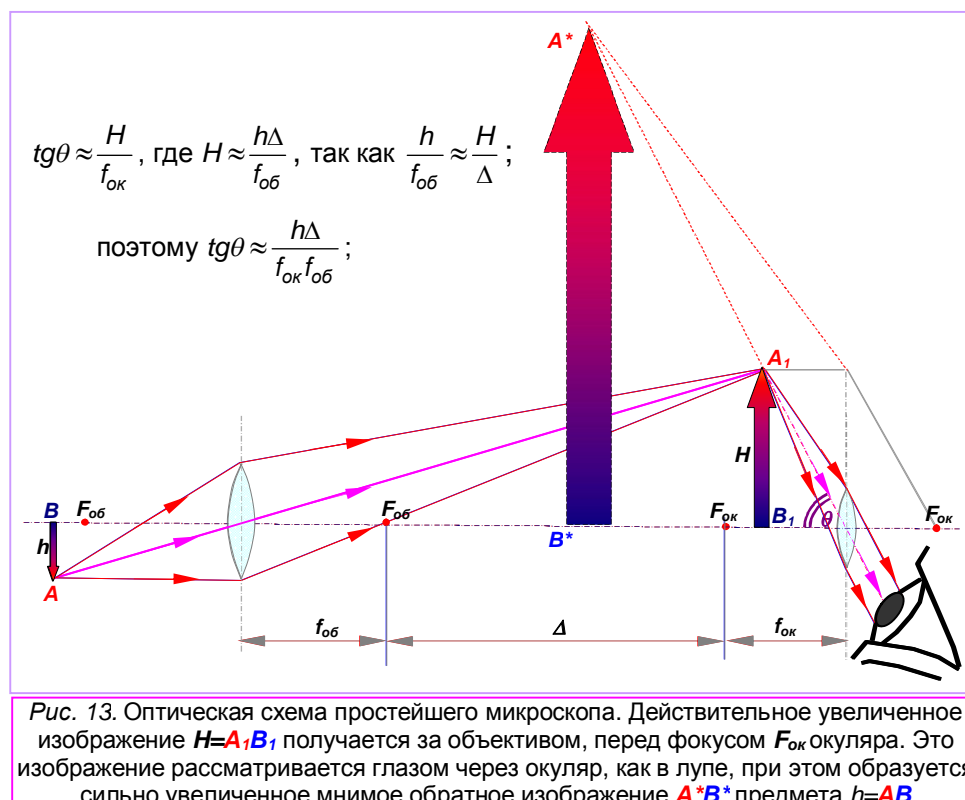


Рис. 13. Оптическая схема простейшего микроскопа. Действительное увеличенное изображение $H=A_1B_1$ получается за объективом, перед фокусом $F_{ок}$ окуляра. Это изображение рассматривается глазом через окуляр, как в лупе, при этом образуется сильно увеличенное мнимое обратное изображение A^*B^* предмета $h=AB$

фокальной плоскости окуляра. Это изображение рассматривается через окуляр как в лупу. Как и в лупе, глаз видит увеличенное мнимое изображение A^*B^* . Но в данном случае оно перевернуто относительно предмета, *рис. 13-14*. Изображение предмета на сетчатке глаза оказывается таким же, как если бы рассматриваемый предмет имел величину A^*B^* . В результате удаётся достигнуть значительно большего увеличения.

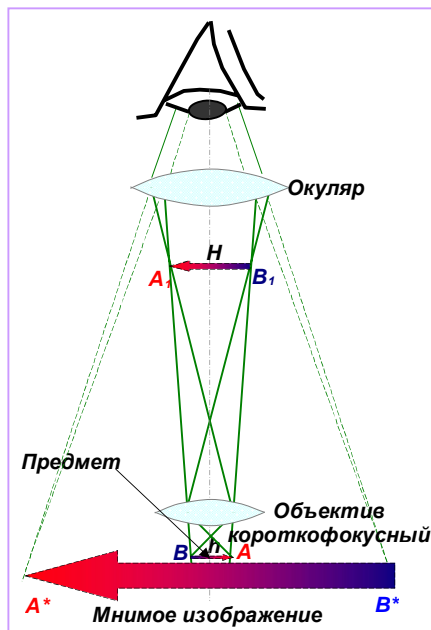


Рис. 14. Ход лучей в микроскопе



Рис. 15. Внешний вид микроскопа со сменными объективами.

Угловое увеличение микроскопа

$$\gamma = \frac{\text{tg}\vartheta}{\text{tg}\vartheta_0} = \frac{D\Delta}{f_{об}f_{ок}}. \quad [13]$$

Здесь учтено, что $\text{tg}\vartheta_0 = \frac{h}{D}$; для $\text{tg}\vartheta$ — см. вывод на *рис. 13*.

Все расстояния указаны на *рис. 13*. D — расстояние наилучшего зрения.

На *рис. 15* показан общий вид оптического микроскопа со сменными объективами.

5⁰. При рассмотрении предметов крупных, но весьма удаленных применяются **зрительные трубы** — подзорные трубы, бинокли, телескопы. Как и микроскоп, они имеют **объектив** и **окуляр**. Объективом зрительной трубы всегда является собирающая линза (или система линз) с достаточно большим фокусным расстоянием. А окуляром может быть как собирающая, так и рассеивающая линза. Соответственно имеется два типа зрительных труб:

- **трубы Галилея**, окуляр которых является рассеивающей линзой (системой линз);
- **трубы Кеплера**, окуляр которых является собирающей линзой (системой линз).

Рассмотрим работу этих зрительных труб.

6⁰. В 1609 Галилей изобрёл свой телескоп, который не только



прославился своей мощностью (он имел увеличение по тем временам огромное $\gamma=34,4$), но и открытиями, которые с его помощью сделал учёный. Галилей обнаружил пятна на Солнце, передвижение которых доказывало, что Солнце вращается вокруг своей оси. Он увидел горы на Луне (и даже вычислил их высоту по размеру теней), выяснил, что она всегда обращена к Земле одной стороной. Наблюдал Галилей и фазы Венеры. Очень важным было открытие спутников Юпитера. Заметил Галилей и кольца Сатурна. Правда, его телескоп ещё не позволял толком их разглядеть, он увидел лишь какие-то туманные пятна по бокам планеты и предположил, что это тоже спутники.

Окуляром трубы Галилея служит рассеивающая линза. Задняя фокальная плоскость объектива совпадает с задней фокальной плоскостью окуляра, *рис. 16*.

Если бы окуляра не было, изображение A^*B^* удалённого предмета AB находилось бы в фокальной плоскости объектива, где оно и показано на *рис. 16*. Это изображение мнимое: лучи из удалённой точки A , которые после прохождения объектива стали сходятся к точке A^* , не доходя до неё, попадают на окуляр. После окуляра они вновь становятся параллельными побочной оси $O_{ок}A^*$ и потому без

напряжения воспринимаются глазом. Но теперь глаз видит изображение предмета под углом θ , который больше угла зрения θ_0 при рассмотрении предмета невооружённым глазом.

Труба Галилея даёт прямое (неперевернутое) изображение предмета.

На рис. 16 видно, что

$$\operatorname{tg}\theta_0 = \frac{H}{f_{об}}; \operatorname{tg}\theta = \frac{H}{f_{ок}}.$$

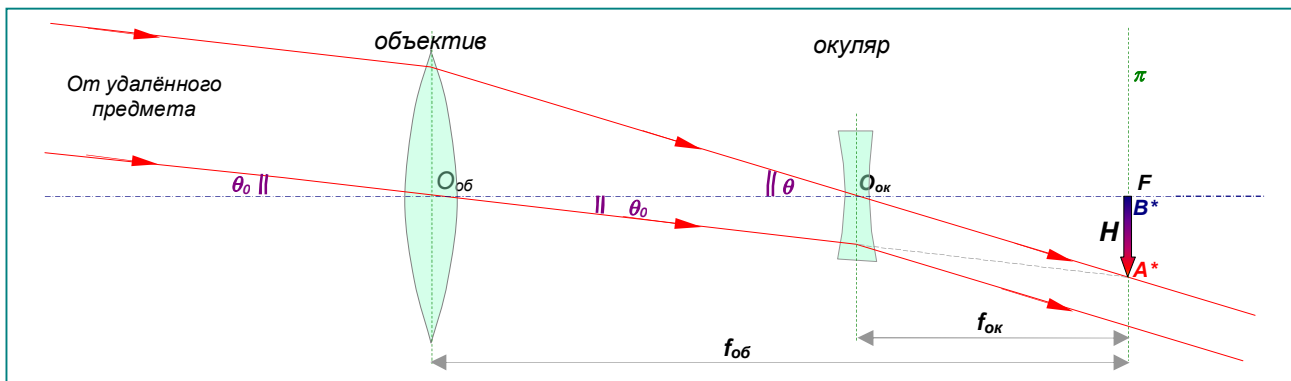


Рис. 16. Ход лучей в трубе Галилея. Изображение $A^*B^*=H$ (мнимое) удалённого предмета AB получается в общей фокальной плоскости π объектива и окуляра. Из окуляра выходит пучок лучей, параллельных побочной оси $O_{ок}A^*$ окуляра под углом θ к главной оси. Попадая в глаз, лучи сходятся на сетчатке и дают действительное изображение источника A .

Угловое увеличение трубы Галилея:

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg}\theta}{\operatorname{tg}\theta_0} = \frac{f_{об}}{f_{ок}} \quad [14]$$

Например, если фокусное расстояние объектива 1 м, а фокусное расстояние окуляра 2 см, то увеличение зрительной трубы $\gamma = 100/2 = 50$.



Рис. 17. Внешний вид театрального бинокля и подзорной трубы, выполненных по схеме трубы Галилея.

Фокусные расстояния в трубе Галилея «наложены» друг на друга, а в трубе Кеплера (см. ниже) они расположены друг за другом. Поэтому при таком же увеличении труба Галилея короче трубы Кеплера. Труба Галилея обычно применяется в театральных биноклях и в подзорных трубах для земных наблюдений. Внешний вид театрального бинокля и подзорной трубы Галилея показан на рис. 17.

7°. **Труба Кеплера** работает следующим образом: объектив даёт изображение

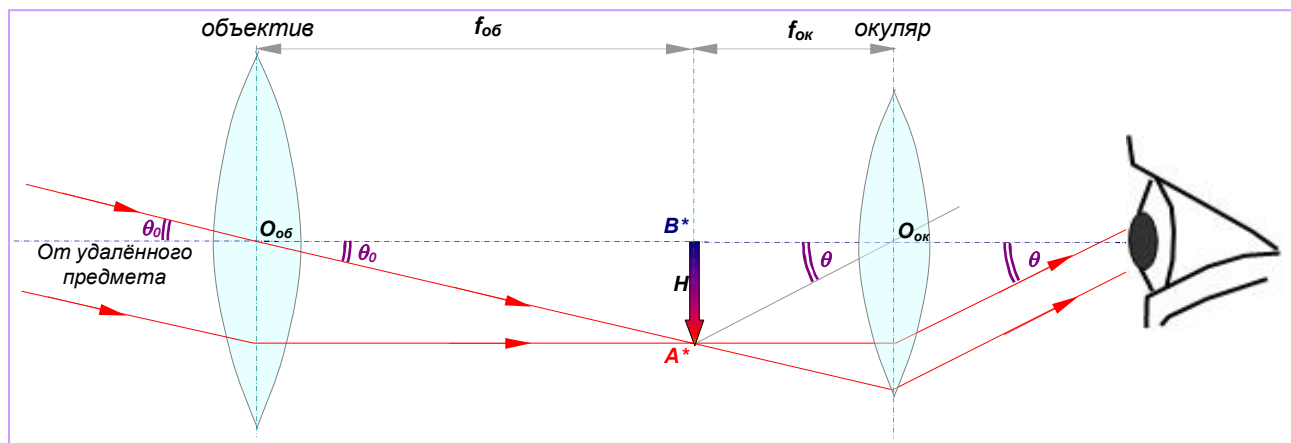


Рис. 18. Ход лучей в трубе Кеплера. Изображение A^*B^* предмета получается в фокальной плоскости за объективом. Окуляр, работающий как лупа, располагается так, что его передний фокус совпадает с задним фокусом объектива. В глаз попадает пучок параллельных лучей под углом зрения $\theta > \theta_0$.

удалённого предмета в своей фокальной плоскости, а затем это изображение рассматривается в окуляре, как в лупу.

Ход лучей в трубе Кеплера показан на *рис. 18*.

Удалённый предмет (стрелка **AB**, направленная вверх) на рисунке не показан. Луч из точки **B** идёт по главной оптической оси объектива и окуляра трубы. Из точки **A** идут два луча, которые ввиду удалённости предмета до входа в трубу можно считать параллельными. Изображение **A*B*=H** предмета, даваемое объективом в задней фокальной плоскости объектива, действительное, уменьшенное, обратное (перевернутое).

Невооружённым глазом удалённый предмет виден под углом θ_0 . Из *рис. 18* видно, что:

$$\operatorname{tg}\theta_0 = \frac{H}{f_{об}}$$

Изображение предмета в окуляре мы видим под углом $\theta > \theta_0$. Из *рис. 18* видно, что:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{H}{f_{ок}}$$

Угловое увеличение трубы Кеплера:

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg}\theta}{\operatorname{tg}\theta_0} = \frac{f_{об}}{f_{ок}}, \quad [14]$$

такое же, как и трубы Галилея.

Для значительных угловых увеличений используются длиннофокусные объективы и короткофокусные окуляры. Например, если фокусное расстояние объектива 1000 мм, а фокусное расстояние окуляра 50 мм, тогда угловое увеличение будет 20-кратным.

То, что из окуляра выходят пучки параллельных лучей, удобно для наблюдения предмета нормальным глазом без напряжения (без аккомодации). Если же зрение отличается от нормального, окуляр устанавливают «по глазам», передвигая его в направлении оси. Так производится настройка зрительной трубы и при рассматривании предметов, расположенных на различных не очень больших расстояниях от наблюдателя.

Обратите внимание, что труба Кеплера даёт перевернутое (обратное) изображение. Если труба Кеплера должна служить для земных наблюдений, то ее снабжают оборачивающей системой (например, системой призм), в результате чего изображение становится прямым. Примером подобного прибора может служить призмный бинокль, *рис. 19*.

Преимуществом трубы Кеплера является то, что в ней имеется действительное

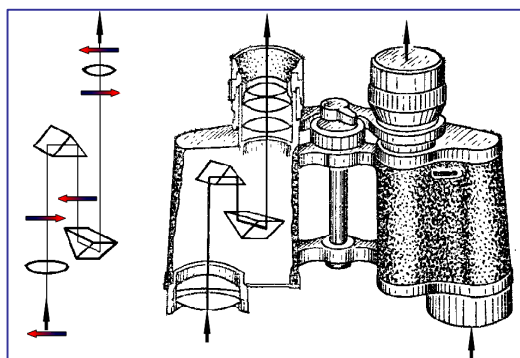


Рис. 19. Призмный бинокль, выполненный по схеме трубы Кеплера – объектив и окуляр выполнены из собирающих линз. Слева показана система поворотных призм.

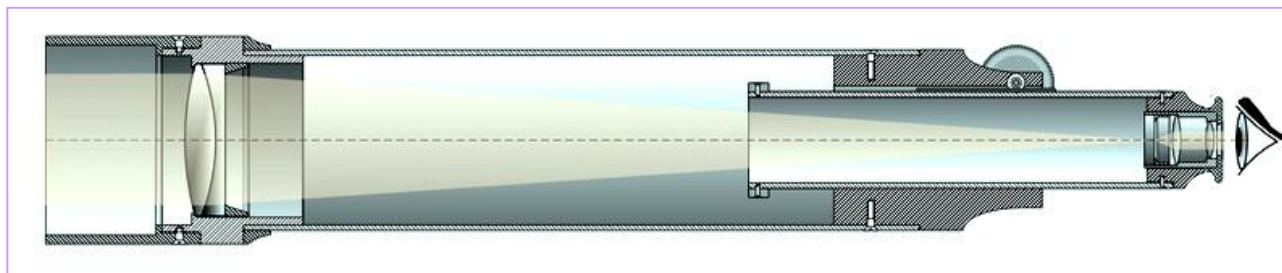


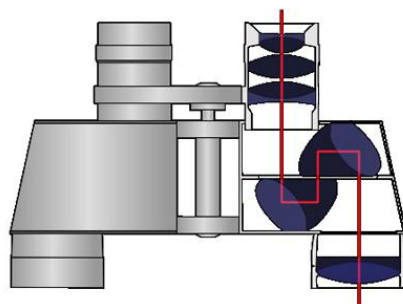
Рис. 20. Телескоп Кеплера. Кеплер в 1611 г. усовершенствовал телескоп Галилея, заменив рассеивающую линзу в окуляре собирающей.

промежуточное изображение, в плоскость которого можно поместить измерительную шкалу, фотопластинку для производства снимков и т. п. Вследствие этого в астрономии и во всех случаях, связанных с измерениями, применяется труба Кеплера, *рис. 20*.



Вопросы

1. Для чего предназначены оптические приборы?
2. Что представляет собой камера-обскура? Почему она так называется? Как зависит чёткость изображения от диаметра входного отверстия этой камеры?
3. Какова роль объектива фотоаппарата? Опишите принцип действия фотоаппарата. Охарактеризуйте изображение, даваемое объективом фотоаппарата.
4. Можно ли сфотографировать предмет, расположенный между объективом и его фокусом? Почему?
5. Что такое диафрагма объектива фотоаппарата? Для чего она используется? Что такое глубина резкости? От чего она зависит?
6. Кто считается изобретателем фотоаппарата? Когда было сделано это изобретение?
7. В чём сходство в устройстве глаза и фотоаппарата?
8. Для чего служат проекционные аппараты?
9. Для чего нужен источник света и конденсор в проекционном аппарате?
10. Как зависит необходимая мощность источника света проектора от размеров экрана?
11. Что такое лупа? Какую линзу называют лупой?
12. Что такое угловое увеличение оптического прибора? Чему равна эта величина для лупы? Чем она ограничена?
13. Как называется угол, опирающийся на дугу окружности длиной в радиус?
14. Из каких оптических элементов состоит микроскоп? Объясните назначение объектива и окуляра.
15. Объясните ход лучей в микроскопе. Напишите выражение для углового увеличения микроскопа.
16. Что такое зрительная труба? Какие зрительные трубы вы знаете? Где они применяются?
17. Как работает зрительная труба Галилея? В чём её преимущества и недостатки?
18. Как работает телескоп Кеплера?
19. Почему театральные бинокли делаются по схеме Галилея, а полевые – по схеме Кеплера? В чём их отличия?
20. Чему равно угловое увеличение зрительных труб Галилея и Кеплера?



Что это за бинокль?

ДОПОЛНЕНИЕ К ГЛАВЕ 7

СВЕДЕНИЯ ИЗ ФОТОМЕТРИИ

1⁰. **Фотометрией** называется раздел оптики, в котором рассматриваются измерения энергии, которую переносят световые лучи. Обычно в фотометрии рассматриваются действия на глаз и другие оптические приборы электромагнитных волн видимого оптического диапазона. Для характеристики этого действия вводятся следующие основные физические величины, характеризующие свет с точки зрения переносимой им энергии: **световой поток, сила света, освещенность**.

2⁰. **Энергия излучения W . Световой поток Φ** . Разнообразные действия света обусловлены в первую очередь наличием определенной энергии излучения (световой энергии). Разберёмся в этом подробнее.

Непосредственное восприятие света обусловлено действием световой энергии, поглощенной чувствительными элементами глаза. То же имеет место и в любом приемнике, способном реагировать на свет, например в фотоэлементе, термоэлементе и фотопластинке. Вследствие этого измерения света сводятся к измерению световой энергии или к измерению величин с нею связанных.

Выделим мысленно на пути света, распространяющегося от какого-либо источника S (рис. 1Д), небольшую площадку σ . Через эту площадку за время t пройдет некоторая энергия излучения W . Для того чтобы измерить эту энергию, надо представить себе эту площадку в виде пленки, покрытой веществом, полностью поглощающим всю падающую на него энергию излучения, например сажей, и измерить поглощенную энергию по нагреванию этой пленки. Отношение

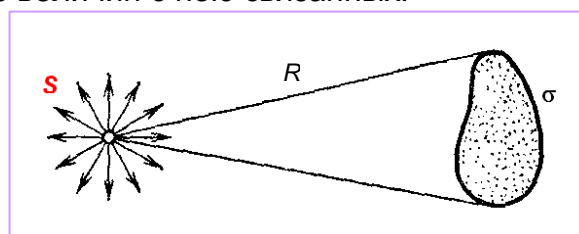


Рис. 1Д. Поток световой энергии, излучаемой источником S , проходит через площадку σ

$$\Phi = W/t \quad [1Д]$$

показывает, какая энергия протекает через площадку за единицу времени, и называется **световым потоком Φ (мощностью излучения)** через площадку σ .

3⁰. Световой поток оценивается в обычных единицах мощности, т. е. в ваттах. Однако для восприятия и использования световой энергии исключительно важную роль играет глаз. Поэтому наряду с энергетической оценкой света пользуются оценкой, основанной на непосредственном световом восприятии глаза. **Поток излучения, оцениваемый по зрительному ощущению, называется световым потоком**.

Таким образом, в световых измерениях используются две системы обозначений и две системы единиц; одна из них основана на **энергетической оценке света**, другая — на оценке света **по зрительному ощущению**.

4⁰. Кривые спектральной чувствительности глаза различных людей несколько различны, особенно в области малых чувствительностей. Кривая, приведенная на рис. 2Д, получена на основании многочисленных измерений; она характеризует чувствительность среднего нормального глаза и утверждена Международным комитетом по стандартам.

При одной и той же мощности излучения зрительное ощущение от лучей **зеленого цвета** будет примерно в 100 раз больше, чем от лучей **красного** или **сине-фиолетового** цвета. Поэтому для зрительной оценки световых потоков необходимо знать чувствительность глаза к свету различной длины волны, (см. таблицу справа и рис. 2Д).

Цвет	Диапазон λ , нм
Фиолетовый	380—440
Синий	440—485
Голубой	485—500
Зелёный	500—565
Жёлтый	565—590
Оранжевый	590—625
Красный	625—740

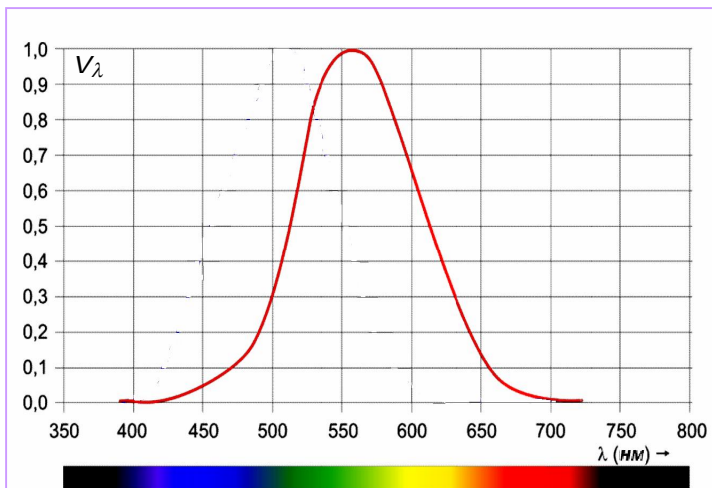


Рис. 2Д. Кривая относительной спектральной чувствительности глаза.

Эта кривая характеризует относительную чувствительность V_λ человеческого глаза от цвета – длины волны λ излучения.

Если чувствительность глаза для длины волны $\lambda=555$ нм (зеленый свет) принять за единицу, то для более длинных и более коротких волн чувствительность быстро уменьшается.

Так, для $\lambda=510$ нм и для $\lambda=610$ нм чувствительность глаза будет равна 0,5 (т. е. уменьшается вдвое); для $\lambda=470$ нм (голубой) и $\lambda=650$ нм (оранжево-красный) она составит около 0,1; для $\lambda=430$ нм (сине-фиолетовый) и $\lambda=675$ нм (красный) — примерно 0,01 и т. д.

5⁰. Уточним используемое в фотометрии понятие «точечный источник света».

Все вопросы, связанные с определением световых величин, особенно просто решаются в том случае, когда источник излучает свет равномерно во всех направлениях. Таким источником является, например, раскаленный металлический шарик. Подобный шарик посылает свет равномерно во все стороны; световой поток от него распределен равномерно по всем направлениям. Это означает, что действие источника на какой-либо приемник света будет зависеть только от расстояния между приемником и центром светящегося шарика, и не будет зависеть от направления радиуса, проведенного к приемнику из центра шарика.

Во многих случаях действие света изучается на расстоянии R , настолько превосходящем радиус r светящегося шарика, что размеры последнего можно не учитывать. Тогда можно считать, что излучение света происходит как бы из одной точки – центра светящегося шара. В подобных случаях источник света называется **точечным источником света**.

Само собой разумеется, что точечный источник не является точкой в геометрическом смысле, а имеет, как и всякое физическое тело, конечные размеры. Источник излучения пренебрежимо малых размеров не имеет физического смысла, ибо такой источник должен был бы с единицы своей поверхности излучать бесконечно большую мощность, что невозможно.

Более того, источник, который мы можем считать точечным, не всегда должен быть малым. Дело не в абсолютных размерах источника, а в соотношении между его размерами и теми расстояниями от источника, на которых исследуется его действие. Так, для всех практических задач наилучшим образом точечных источников являются звезды; хотя они имеют огромные размеры, расстояния от них до Земли во много раз превосходят эти размеры.

Необходимо помнить, что прообразом точечного источника является равномерно светящийся шарик. Поэтому источник света, посылающий свет неравномерно в разные стороны, не является (изотропным) точечным, хотя бы он был и очень маленьким по сравнению с расстоянием до точки наблюдения.

6⁰. Для дальнейшего надо вспомнить, что такое **телесный угол** Ω . Это безразмерная величина, равная отношению площади поверхности σ , вырезанной на сфере конусом с вершиной в центре сферы S , к квадрату её радиуса r , рис. 3Д:

$$\Omega = \sigma / r^2. \quad [2Д]$$

Это отношение не зависит от r , так как с ростом r вырезаемая конусом поверхность σ увеличивается пропорционально r^2 . Если $r=1$, то Ω численно равен σ , т. е. телесный угол измеряется поверхностью, вырезанной конусом на сфере единичного радиуса. Единицей телесного угла является **стерадиан (ср)** – телесный угол, которому на сфере единичного радиуса соответствует поверхность с площадью, равной единице ($\sigma=1=r^2$).

Телесный угол, охватывающий все пространство вокруг источника, равен 4π ср, ибо площадь всей

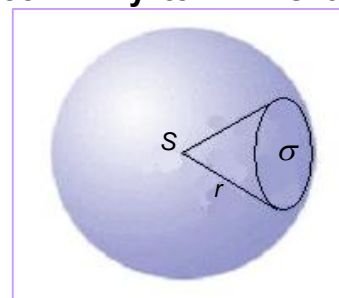


Рис. 3Д. Телесный угол Ω измеряется отношением поверхности σ , вырезанной на сфере конусом к квадрату радиуса сферы r .

поверхности сферы единичного радиуса равна 4π .

Стерadian — пространственный радиан. Он, как видно из текста, определяется совершенно аналогично радиану, являющемуся единицей угла на плоскости.

7⁰. Полное излучение какого-либо источника распределяется в телесном угле 4π ср — по всем радиусам сферы, охватывающей источник. Излучение называется **равномерным** или **изотропным**, если в одинаковые телесные углы, выделенные по любому направлению, излучается одинаковая мощность. Чем меньше телесные углы, в которых мы производим сравнение мощности, излучаемой источником, тем с большей точностью мы проверяем равномерность излучения.

Итак, **точечным источником** является источник, размеры которого малы по сравнению с расстоянием до места наблюдения (1) и который посылает световой поток равномерно во все стороны (2).

8⁰. **Сила света и освещенность**. Полный световой поток Φ_0 характеризует излучение, которое распространяется от источника по всем направлениям, т. е. излучение в телесном угле 4π ср. Для практических же целей часто важнее знать не полный световой поток, а тот поток, который идет по определенному направлению или падает на определенную площадку. Так, например, автомобилисту важно получить достаточно большой световой поток в сравнительно узком телесном угле, внутри которого находится небольшой участок шоссе. Для работающего за письменным столом важен тот поток, который освещает стол или даже часть стола, тетрадь или книгу, т. е. поток, приходящийся на некоторую площадь.

В соответствии с этим установлены два вспомогательных понятия — **сила света** (I) и **освещенность** (E).

Силой света называют световой поток, рассчитанный на телесный угол, равный стерadianу, т. е. отношение светового потока Φ , заключенного внутри телесного угла Ω , к этому углу:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}. \quad [3Д]$$

Освещенность же есть световой поток, рассчитанный на единицу площади, т. е. отношение светового потока Φ , падающего на площадь σ , к этой площади:

$$E = \frac{\Phi}{\sigma}. \quad [4Д]$$

Понятно, что формулы [3Д] и [4Д] определяют *среднюю* силу света и *среднюю* освещенность. Они будут тем точнее, чем равномернее поток и чем меньше Ω и σ .

С помощью источника, посылающего определенный световой поток, мы можем осуществить разнообразную силу света и разнообразную освещенность. Действительно, если направить весь поток или большую его часть внутрь малого телесного угла, то в направлении, выделенном этим углом, можно получить очень большую силу света. Так, например, в прожекторах удается сосредоточить большую часть потока, посылаемого электрической дугой, в очень малом телесном угле и получить в соответствующем направлении огромную силу света.

В меньшей степени той же цели достигают с помощью автомобильных фар. Если сконцентрировать с помощью отражателей или линз световой поток от какого-либо источника на небольшой площади, то можно достигнуть большой освещенности. Так поступают, например, стремясь сильно осветить препарат, рассматриваемый в микроскоп; аналогичное назначение выполняет рефлектор лампы, обеспечивающий хорошую освещенность рабочего места.

Согласно формуле [3Д] световой поток Φ равен произведению силы света I на телесный угол Ω , в котором он распространяется:

$$\Phi = I\Omega. \quad [3Д]^*$$

Если телесный угол $\Omega=0$, т. е. лучи строго параллельны, то световой поток также равен нулю. Это означает, что строго параллельный пучок световых лучей не несет никакой энергии, т. е. не имеет физического смысла, — ни в одном реальном опыте не может быть осуществлен строго параллельный пучок. Это — чисто геометрическое понятие. Тем не менее, параллельными пучками лучей очень широко пользуются в оптике. Дело в том, что небольшие отступления от параллельности световых

R

лучей, имеющие с энергетической точки зрения принципиальное значение, в вопросах, связанных с прохождением световых лучей через оптические системы, практически не играют никакой роли. Например, углы, под которыми лучи от удаленной звезды попадают в наш глаз или телескоп, настолько малы, что они даже не могут быть измерены существующими методами; практически эти лучи не отличаются от параллельных. Однако, эти углы все же не равны нулю, и именно благодаря этому мы и видим звезду. Световые пучки с очень острой направленностью, т. е. с очень малой расходимостью световых лучей, получают при помощи лазеров. На этом основано, например, использование лазерной указки. Однако и в этом случае углы между лучами имеют конечное значение.

9⁰. **Законы освещенности.** Как показывают формулы [3Д] и [4Д], величины E и I связаны между собой.

Пусть точечный источник S освещает небольшую площадку σ , расположенную на расстоянии R от источника, *рис. 4Д*.

Построим телесный угол Ω , вершина которого лежит в точке S и который опирается на края площадки σ . Он равен σ/R^2 . Поток, посылаемый источником в этот телесный угол, обозначим через Φ . Тогда сила света $I = \Phi/\Omega = \Phi R^2/\sigma$, освещенность $E = \Phi/\sigma$. Отсюда

$$E = I/R^2 \quad [5Д]$$

т. е. **освещенность площадки равна силе света, деленной на квадрат расстояния до точечного источника.** Сравнивая освещенности площадок, расположенных на разных расстояниях R_1, R_2 от точечного источника, найдем $E_1 = I/R_1^2$, $E_2 = I/R_2^2$ и т. д., или

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{R_2^2}{R_1^2} \quad [6Д]$$

т. е. **освещенность обратно пропорциональна квадрату расстояния от площадки до точечного источника.** Это так называемый **закон обратных квадратов.**

Если бы площадка σ была расположена не перпендикулярно к оси потока, а повернута на угол α , то она имела бы размеры $\sigma = \sigma_0 \cos \alpha$ *рис. 5Д*, где σ_0 — площадка, пересекающая тот же телесный угол перпендикулярно к оси пучка, так что $\Omega = \sigma/R^2$. Мы предполагаем площадки σ и σ_0 настолько малыми и столь удаленными от источника, что для всех точек этих площадок расстояние до источника может считаться одинаковым (R) и лучи во всех точках составляют с перпендикуляром к площадке σ один и тот же угол α (*угол падения*).

В таком случае освещенность площадки σ есть:

$$E = \frac{\Phi}{\sigma} = \frac{\Phi \cdot \cos \alpha}{\sigma_0} = \frac{\Phi \cdot \cos \alpha}{\Omega \cdot R^2} = \frac{I \cdot \cos \alpha}{R^2}. \quad [7Д]$$

Итак, **освещенность, создаваемая точечным источником на некоторой площадке, равна силе света, умноженной на косинус угла падения света на площадку и деленной на квадрат расстояния до источника.**

Закон обратных квадратов [6Д] соблюдается вполне строго для точечных источников. Если же размеры источника не очень малы по сравнению с расстоянием до освещаемой поверхности, то освещенность убывает медленнее, чем по закону $1/R^2$; в частности, если размеры светящейся поверхности велики по сравнению с R , то освещенность практически не меняется при изменении R . Чем меньше размеры

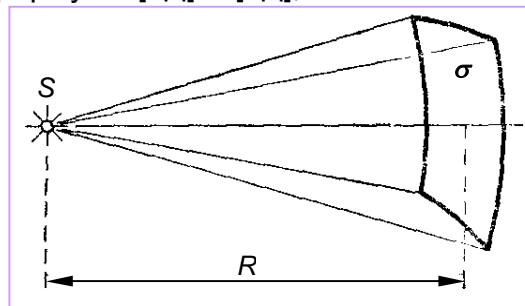


Рис. 4Д. Освещённость E площадки σ , перпендикулярной к оси светового потока, определяется силой света и расстоянием R от точечного источника S до площадки.

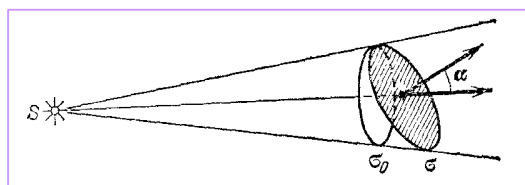


Рис. 5Д. Освещённость площадки σ , пропорциональна косинусу угла α , образованного перпендикуляром к площадке с направлением светового потока, т. е. косинусу угла падения светового луча.

источника d по сравнению с R , тем лучше выполняется закон обратных квадратов. Так, при соотношении $d/R \leq 1/10$ расчеты изменения освещенности по формуле [6Д] дают вполне хорошее согласие с наблюдением. Таким образом, закон обратных квадратов можно считать практически выполняющимся, если размеры источника не превышают 0,1 расстояния до освещаемой поверхности.

Освещенность поверхности, как видно из формулы [7Д], зависит, кроме того, от угла, под которым падают на эту поверхность световые лучи.

10⁰. **Единицы световых величин.** В системе световых единиц за исходную величину принята **единица силы света**. Эта единица имеет условный характер: в качестве единицы силы света принята сила света некоторого эталонного источника. Таким источником, дающим силу света $I=1$, вначале условились считать пламя свечи, изготовленной строго стандартным образом. Однако этот эталонный источник оказался мало удобным, так как даваемая им сила света несколько изменяется по мере образования «нагара» и, кроме того, зависит от температуры и влажности воздуха.



Для установления эталона силы света было предложено много других источников, в частности эталонные электрические лампы накаливания, образцы которых хранятся в крупных государственных измерительных лабораториях и контролируются взаимными сравнениями.

Единица силы света называется канделой (кд) — от латинского слова *candela*, что означает свеча. Кандела равна силе света в заданном направлении источника, испускающего излучение частоты $540 \cdot 10^{12}$ Гц (длина волны в вакууме 555 нм), энергетическая сила света которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср. Кандела является одной из основных единиц Международной системы единиц (СИ).

Эталоны в виде электрических ламп не являются достаточно постоянными и в случае их порчи не могут быть точно воспроизведены. Поэтому международным соглашением введен новый эталон, который можно точно воспроизвести. Он представляет собой специально устроенный сосуд, в котором расплавляется химически чистая платина; в платину вставлена тугоплавкая узкая трубочка, раскаляемая до температуры платины. Свет испускается внутренней полостью трубочки через ее открытый конец. При затвердевании чистой платины температура ее имеет строго определенное значение, равное 2042 К. Сила света, излучаемого при этой температуре в направлении оси трубочки с поверхности, равной $1/60 \pi \text{ см}^2$, будет строго определенной. Эта сила света равна одной канделе.

За единицу светового потока принят люмен (обозначается лм). Люмен есть световой поток, испускаемый точечным источником, сила света которого равна 1 кд, внутри единичного телесного угла (т. е. угла, равного 1 ср). Для излучения, соответствующего максимуму спектральной чувствительности глаза ($\lambda=555 \text{ нм}$), световой поток равен 683 люменам, если энергетическая сила света равна 1 Вт/ср.

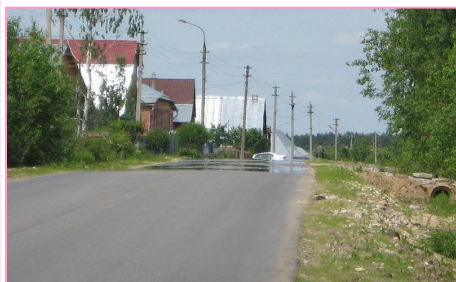
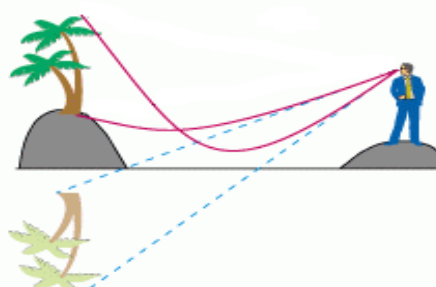
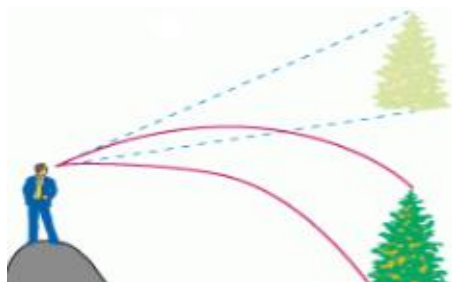
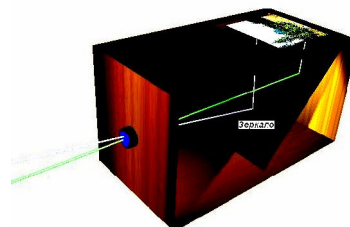
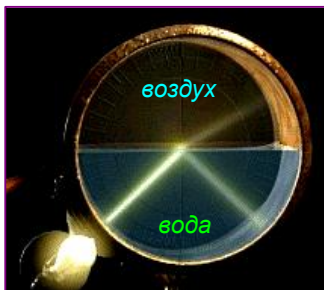
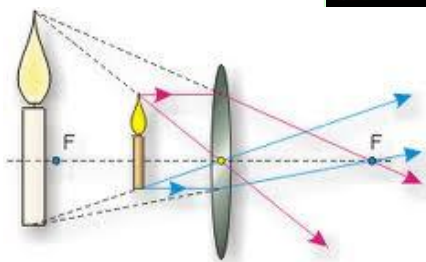
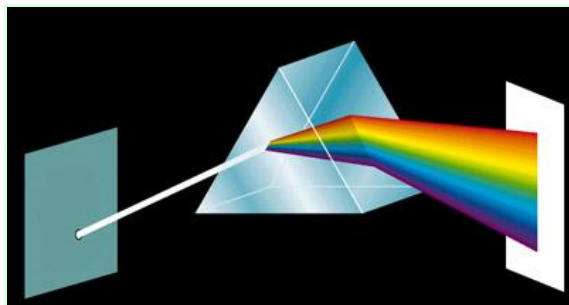
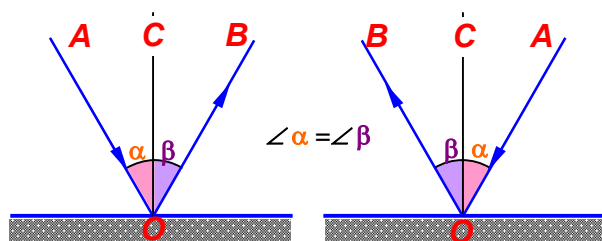
За единицу освещенности принимается освещенность такой поверхности, на 1 м² которой падает световой поток 1 лм, равномерно распределенный по площадке.

Эта единица освещенности называется **люкс (лк)**. Освещенность 1 лк получается на поверхности сферы радиуса 1 м, если в центре сферы помещен точечный источник, сила света которого равна 1 кд. Приведем значения освещенности (в люксах) для некоторых типичных случаев (см. таблицу).

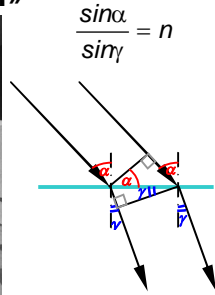
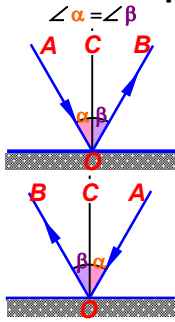
Условия освещения	лк
Освещенность под прямыми солнечными лучами в полдень (средние широты)	100 000
Освещенность при киносъёмке в ателье	10 000
Освещенность на открытом месте в пасмурный день	1000
Освещенность в светлой комнате не очень далеко от окна	100
Освещенность на рабочем столе для тонких работ	100 – 200
Освещенность необходимая для чтения	30 – 50
Освещенность на экране кинотеатра	20 – 80
Освещенность от полной Луны	0,2
Освещенность от ночного неба в безлунную ночь	0,0003
Свет Сириуса, ярчайшей звезды ночного неба	10^{-5}

СВЕТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

КРОССВОРДЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ



№8. Кроссворд для повторения главы 7 «ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ»



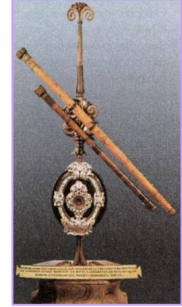
$$D = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

$$n = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$



$$\gamma = \frac{\text{tg } \theta}{\text{tg } \theta_0} = \frac{D}{f}$$

$$\gamma = \frac{\text{tg } \theta}{\text{tg } \theta_0} = \frac{f_{\text{об}}}{f_{\text{ок}}}$$



A crossword puzzle grid with 26 numbered starting points. The grid is filled with green cells. Various optical diagrams and images are placed around the grid to provide clues for the words. The clues are:

- 1, 1: (Down) Diagram of a lens focusing light.
- 2: (Right) Diagram of a microscope.
- 3: (Right) Diagram of a lens focusing light.
- 4: (Right) Diagram of a lens focusing light.
- 5: (Right) Diagram of a lens focusing light.
- 6: (Right) Diagram of a lens focusing light.
- 7: (Right) Photograph of a flashlight beam.
- 8: (Right) Photograph of eyeglasses.
- 9: (Right) Diagram of a lens focusing light.
- 10, 13: (Down) Photograph of a colorful firecracker.
- 11: (Right) Diagram of a lens focusing light.
- 12: (Right) Diagram of a lens focusing light.
- 13: (Right) Diagram of a lens focusing light.
- 14: (Right) Photograph of a classical building (The White House) reflected in water.
- 15: (Right) Diagram of a prism dispersing light into a spectrum.
- 16: (Right) Diagram of a lens focusing light.
- 17: (Right) Diagram of a lens focusing light.
- 18: (Right) Diagram of a telescope.
- 19: (Right) Photograph of a camera lens.
- 20: (Right) Photograph of a camera lens.
- 21: (Right) Photograph of a camera lens.
- 22: (Right) Photograph of a camera lens.
- 23: (Right) Photograph of a camera lens.
- 24: (Right) Photograph of a camera lens.
- 25: (Right) Diagram of light rays passing through a lens.
- 26: (Right) Photograph of a sunset over a beach.

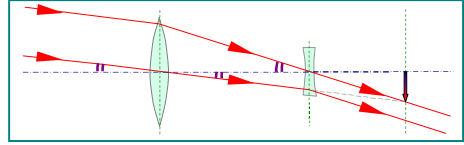
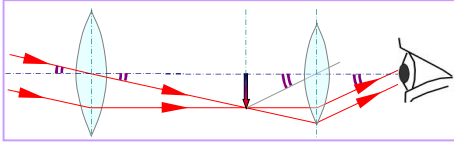
По горизонтали:

1. Недостаток зрения, при котором параллельные лучи после преломления в глазу сходятся под таким углом, что фокус оказывается расположенным за сетчаткой.
2. Одна из любимых игрушек детей в виде трубки, содержащей внутри плоские продольные зеркала, сложенные в виде трёхгранной призмы.
3. Эластичное, прозрачное тело в глазу, имеющее форму двояковыпуклой линзы.
4. Величина, характеризующая преломление света.
5. Недостаток зрения, при котором параллельные лучи после преломления в глазу собираются не на сетчатке, а ближе к хрусталику.
6. Совокупность световых лучей.
7. Наружная оболочка глазного яблока.
8. Прозрачная часть склеры.
9. Картина, получаемая в результате прохождения через оптическую систему световых лучей, распространяющихся от объекта.
10. Устройство для отражения световых лучей.
11. Элемент из прозрачного материала, используемый для преломления световых лучей.
12. Способность глаза приспособлять фокусное расстояние хрусталика к расстоянию до наблюдаемого предмета.
13. Часть оптического прибора, обращённая к глазу.
14. Область за предметом, недоступная для прямых лучей от источника света.
15. Область за предметом, недоступная для части прямых лучей от источника света.
16. Прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями.
17. Универсальный проекционный аппарат.
18. Прибор, дающий мощный пучок параллельных лучей света.
19. Название оптической системы, дающей расходящиеся лучи света.
20. Система линз в проекционном аппарате перед диапозитивом.
21. Оптический прибор из двух параллельно расположенных зрительных труб.
22. Автор телескопа с двумя собирающими оптическими системами.
23. Изображение, которое можно видеть глазом, но нельзя получить на экране.
24. Вид отражения, не дающего чёткого изображения предмета.
25. Астрономическая ситуация, при которой одно небесное тело заслоняет свет от другого небесного тела.

По вертикали:

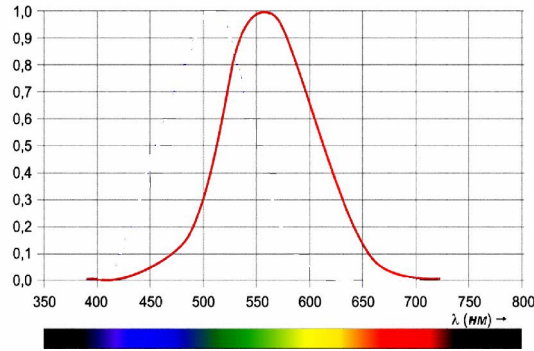
1. Зависимость показателя преломления света от его цвета.
2. Оптический прибор для рассмотрения очень мелких предметов.
3. Раздел физики, рассматривающий явления, связанные с распространением света.
4. Самый распространённый прибор для улучшения зрения.
5. Форма рассеивающей линзы.
6. Автор телескопа с окуляром в виде рассеивающей линзы.
7. Часть глазного дна, где расположены окончания зрительного нерва.
8. Зрительная труба для изучения космических объектов.
9. Орган зрения.
10. Оптическое устройство, способное создавать чёткое мнимое изображение предмета.
11. Оптический прибор, позволяющий простейшим образом увеличить угол зрения.
12. Оптический прибор для наблюдений из укрытий.
13. Изменение направления световых лучей на границе двух сред, при котором они возвращаются в первую среду.
14. Пучок света малого поперечного размера.
15. Отражатель световых лучей в форме вогнутой полированной поверхности.
16. Лучи, незначительно отклоняющиеся от оптической оси.
17. Оптическая система прибора, дающая действительное перевернутое изображение предмета.
18. Геометрическая форма собирающей линзы.
19. Точка, в которой сходятся лучи света, падающие на зеркало.
20. Древнегреческий учёный, открывший закон прямолинейного распространения света.
21. Отверстие в радужной оболочке глаза.
22. Название плоскости, проходящей через фокус, перпендикулярно главной оптической оси.
23. Оптический прибор для создания изображения на большом экране.
24. Оптическое явление в атмосфере при её оптической неоднородности.

№9. Кроссворд для повторения главы 7 «ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ»



$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \theta}{\operatorname{tg} \theta_0}$$

$$\gamma = \frac{D}{f_{\text{л}}}$$



$$\gamma = \frac{f_{\text{об}}}{f_{\text{ок}}}$$

$$\gamma = \frac{D\Delta}{f_{\text{об}}f_{\text{ок}}}$$

A crossword puzzle grid with 14 numbered starting points. The grid is surrounded by various optical images and diagrams:

- 1:** Samsung L700 camera
- 2:** Magnifying glass
- 3:** Candle flame
- 4:** Camera lens
- 5:** Binoculars
- 6:** Camera lens
- 7:** Eye diagram
- 8:** Human eye
- 9:** Microscope
- 10:** Telescope
- 11:** Eye diagram with light rays
- 12:** Camera diagram
- 13:** Camera diagram
- 14:** Eye diagram

Some grid cells contain symbols: @ (12, 13, 13), and a red arrow (11).

По горизонтали:

1. Универсальный проектор.
2. Сдвоенная зрительная труба.
3. Светонепроницаемая камера с отверстием и экраном.
4. Оптический прибор для получения изображений на плёнке.
5. Единица освещённости.
6. Единица светового потока.
7. Датский астроном, автор закона преломления света.
8. Мощность излучения (другое название)
9. Создатель первого телескопа
10. Величина, равная отношению светового потока, падающего на площадь, к этой площади.
11. Кандела по-русски
12. Прямая, проходящая через оптический центр линзы
13. Часть пространства, в котором распространяются лучи точечного источника света

По вертикали:

1. Простейший оптический прибор.
2. Мера телесного угла.
3. Регулируемое отверстие объектива.
4. Величина, равная отношению светового потока, заключенного внутри телесного угла, к этому углу.
5. Оптический узел, обращённый к глазу.
6. Плоский угол, для которого длина соответствующей дуги равна радиусу.
7. Важнейший оптический узел фотоаппарата.
8. Разновидность зрительной трубы.
9. Оптический прибор для демонстрации изображений на экране.
10. Прибор, позволяющий получать значительные угловые увеличения близко расположенных мелких предметов.
11. Раздел оптики, в котором рассматриваются измерения энергии, которую переносят световые лучи.
12. Изобретатель телескопа с окуляром в виде выпуклой линзы.
13. Короткофокусная система линз в проекторе.
14. Единица силы света в Международной системе единиц (СИ).

КАКИЕ ЗНАКОМЫЕ ВАМ СВЕТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ ВЫ МОЖЕТЕ ЗАМЕТИТЬ НА ЭТИХ КАРТИНАХ?



Прямолинейное распространение света, его рассеивание, образование тени, отражение зеркальное, диффузное, полное? Преломление световых лучей, разложение белого света? Какие из этих явлений можно увидеть чаще? Какие реже? Почему?



«ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ» Решение кроссворда №8



По вертикали:

1. дальность; 2. калейдоскоп; 3. хрусталик; 4. показатель; 5. близорукость; 6. пучок; 7. склера; 8. роговица; 9. изображение; 10. отражатель; 11. призма; 12. аккомодация; 13. окуляр; 14. тень; 15. полутень; 16. линза; 17. эпидиаскоп; 18. прожектор; 19. рассеивающая; 20. конденсор; 21. бинокль; 22. Коперник; 23. мнимое; 24. диффузное; 25. затмение

По горизонтали:

1. дисперсия; 2. микроскоп; 3. оптика; 4. очки; 5. вогнутая; 6. Галилей; 7. сетчатка; 8. телескоп; 9. глаз; 10. зеркало; 11. лупа; 12. перископ; 13. отражение; 14. луч; 15. рефлектор; 16. параксиальные; 17. объектив; 18. выпуклая; 19. фокус; 20. Евклид; 21. зрачок; 22. фокальная; 23. проектор; 24. мираж.

Решение кроссворда №9

По горизонтали:

1. эпидиаскоп; 2. бинокль; 3. камера обскура; 4. фотоаппарат; 5. люкс; 6. люмен; 7. Снелл; 8. световой поток; 9. Галилей; 10. освещённость; 11. свеча; 12. оптическая ось; 13. телесный угол.

По вертикали:

1. лупа; 2. стерадиан; 3. диафрагма; 4. сила света; 5. окуляр; 6. радиан; 7. объектив; 8. подзорная труба; 9. проектор; 10. микроскоп; 11. фотометрия; 12. Кеплер; 13. конденсор; 14. кандела;.



ОГЛАВЛЕНИЕ

Раздел 1 ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ	1
ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
Глава 1 . ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ И СПОСОБЫ ЕЁ ИЗМЕНЕНИЯ.....	4
§ 1. ТЕПЛОВОЕ ДВИЖЕНИЕ. ТЕМПЕРАТУРА	4
§ 2. ПОЛНАЯ И ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ	12
§ 3. ДВА СПОСОБА ИЗМЕНЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ ТЕЛА.....	15
§ 4. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ.....	21
§ 5. КОНВЕКЦИЯ	23
§ 6. ИЗЛУЧЕНИЕ (РАДИАЦИЯ).....	28
§ 7. КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ. ЕДИНИЦЫ КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОТЫ	32
§ 8. УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ	34
§ 9. РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОТЫ, СООБЩАЕМОГО ТЕЛУ ПРИ ЕГО НАГРЕВАНИИ ИЛИ ВЫДЕЛЯЕМОГО ПРИ ЕГО ОХЛАЖДЕНИИ.....	35
§ 10. ЭНЕРГИЯ ТОПЛИВА. УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТА СГОРАНИЯ ТОПЛИВА ...	36
§ 11. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ И ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ В МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССАХ.....	40
Приложение №1 ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ.....	43
Приложение №2 КАК МОЖНО УМЕНЬШИТЬ ПЕРЕДАЧУ ТЕПЛА.....	45
Приложение №3 ТЕПЛОПЕРЕДАЧА И РАСТИТЕЛЬНЫЙ МИР.....	47
Приложение №4 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ СОЛНЦА НА ЗЕМЛЕ.....	47
Глава 2. ИЗМЕНЕНИЕ АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВА... ..	50
§ 12. АГРЕГАТНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА	50
§ 13. ПЛАВЛЕНИЕ И ОТВЕРДЕВАНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕЛ	52
§ 14. ГРАФИК ПЛАВЛЕНИЯ И ОТВЕРДЕВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕЛ. ...	53
§ 15. УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТА ПЛАВЛЕНИЯ	55
§ 16. ИСПАРЕНИЕ. НАСЫЩЕННЫЙ И НЕНАСЫЩЕННЫЙ ПАР	57
§ 17. ПОГЛОЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПРИ ИСПАРЕНИИ ЖИДКОСТИ И ВЫДЕЛЕНИЕ ЕЕ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА	59
§ 18. КИПЕНИЕ.....	61
§ 19. ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА. СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА.....	64
§ 20. УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТА ПАРООБРАЗОВАНИЯ И КОНДЕНСАЦИИ	66
Приложение №1 АМОΡФНЫЕ ТЕЛА, ПЛАВЛЕНИЕ АМОΡФНЫХ ТЕЛ.....	69
Приложение №2 ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ЛИТЬЯ	71
Глава 3. ТЕПЛОВЫЕ МАШИНЫ.....	72
§ 21. РАБОТА ПАРА И ГАЗА ПРИ РАСШИРЕНИИ.....	72
§ 22. ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ	73
§ 23. ПАРОВАЯ ТУРБИНА	76
§ 24. КПД ТЕПЛОВОГО ДВИГАТЕЛЯ	77
§ 24.а. ХОЛОДИЛЬНАЯ УСТАНОВКА	80
Приложение №1 НЕОБРАТИМЫЕ ЯВЛЕНИЯ И НЕОБРАТИМОСТЬ ВРЕМЕНИ.....	82
Приложение №2 КАК ПРЕВРАТИТЬ ЭНЕРГИЮ В РАБОТУ? ВСЕГДА ЛИ ЭТО ВОЗМОЖНО?	83
ДОПОЛНЕНИЕ К РАЗДЕЛУ 1. ЕЩЁ КОЕ-ЧТО О ТЕРМОДИНАМИКЕ.....	85
1. ЧТО ТАКОЕ СОВРЕМЕННАЯ ТЕРМОДИНАМИКА.....	85
2. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА, ВНЕШНЯЯ СРЕДА И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ НИМИ	87
3. ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ И УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА.....	88
4. О РАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЯХ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ	89

ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ (ПОВТОРЕНИЕ) Кроссворды.....	91
Кроссворд №1 «Внутренняя энергия и способы её изменения»	92
Кроссворд №2 «Изменение агрегатных состояний вещества»	94
Кроссворд №3 «Тепловые машины»	96
Решение кроссвордов	98
Раздел 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ [1].....	100
ПРЕДИСЛОВИЕ.....	101
Глава 4. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОСТАТИКИ.....	102
§ 25. ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ТЕЛ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД.....	102
§ 26. ДВА РОДА ЗАРЯДОВ. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ТЕЛ.....	103
§ 27. ЭЛЕКТРОСКОП. ПРОВОДНИКИ И НЕПРОВОДНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА....	104
§ 27,а. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА.....	105
§ 27,б. СИЛА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ – ЗАКОН	
КУЛОНА.....	106
§ 28. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ. НАПРЯЖЁННОСТЬ ПОЛЯ. ПРИНЦИП	
СУПЕРПОЗИЦИИ ПОЛЕЙ. ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ПОЛЕЙ	109
§ 28а. РАБОТА В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ.	
ПОТЕНЦИАЛ И РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ.....	114
§ 29. ДЕЛИМОСТЬ И МИНИМАЛЬНАЯ ВЕЛИЧИНА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО	
ЗАРЯДА.....	119
§ 30. ОПЫТЫ РЕЗЕРФОРДА И СТРОЕНИЕ АТОМА.....	121
§ 31. ОБЪЯСНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ТЕЛ.....	125
§ 31,а. КОНДЕНСАТОРЫ – НАКАПИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.....	127
Приложение №1 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯДА В ПРОВОДНИКЕ.....	133
Приложение №2 ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ.....	134
Приложение №3 ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ.....	136
Глава 5. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК.....	138
§ 32. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК.....	138
§ 32,а. ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА.....	139
§ 33. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ И ЕЁ СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ.....	143
§ 34. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ.....	144
§ 35. ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА.....	145
§ 36. НАПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА.....	147
§ 37. СИЛА ТОКА. ЕДИНИЦЫ СИЛЫ ТОКА И КОЛИЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСТВА.	149
§ 38. АМПЕРМЕТР. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТОКА.....	151
§ 39. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ	153
§ 40. ЕДИНИЦЫ НАПРЯЖЕНИЯ.....	155
§ 41. ВОЛЬТМЕТР. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ.....	156
§ 42. ЗАВИСИМОСТЬ СИЛЫ ТОКА ОТ НАПРЯЖЕНИЯ.....	157
§ 43. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОДНИКОВ. ЕДИНИЦЫ	
СОПРОТИВЛЕНИЯ.....	158
§ 44. ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ.....	160
§ 45. РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА. УДЕЛЬНОЕ	
СОПРОТИВЛЕНИЕ.....	162
§ 46. ПРИМЕРЫ НА РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА, СИЛЫ ТОКА И	
НАПРЯЖЕНИЯ.....	164
§ 47. РЕОСТАТЫ И ДРУГИЕ РЕЗИСТОРЫ.....	166
§ 47а. ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ ОТ	
ТЕМПЕРАТУРЫ.....	168
§ 48. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ.....	170
§ 49. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ.....	172
§ 50. РАБОТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА.....	176

§ 51. МОЩНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА.....	178
§ 52. ЕДИНИЦЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА, ПРИМЕНЯЕМЫЕ НА ПРАКТИКЕ.....	179
§ 53. НАГРЕВАНИЕ ПРОВОДНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ. ЗАКОН ДЖОУЛЯ – ЛЕНЦА.....	180
§ 54. ЛАМПА НАКАЛИВАНИЯ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ.....	182
§ 55. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ. ПРЕДОХРАНИТЕЛИ.....	184
Приложение №1 ВНЕШНИЙ И ВНУТРЕННИЙ УЧАСТКИ ЦЕПИ. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА (ЭДС). ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ И СЛЕДСТВИЯ ИЗ НЕГО.....	186
Приложение №2 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЭЛЕКТРОЛИТАХ.....	189
Приложение №3 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ.....	193
Приложение №4 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ... ..	201
Приложение №5 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ВАКУУМЕ.....	210
Приложение №6 СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ.....	214
Глава 6. МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ.....	216
§ 56. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ.....	216
§ 57. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПРЯМОГО ТОКА. МАГНИТНЫЕ ЛИНИИ.....	217
§ 58. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ КОНТУРА И КАТУШКИ С ТОКОМ. ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ.....	219
§ 59. ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ.....	221
§ 60. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ.....	224
§ 61. ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВОДНИК С ТОКОМ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ.....	227
Приложение №1 ВЫЧИСЛЕНИЕ СИЛЫ АМПЕРА.....	231
Приложение №2 ВЫЧИСЛЕНИЕ МОМЕНТА СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩЕГО НА РАМКУ С ТОКОМ В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УГЛАХ ЕЁ ПОВОРОТА.....	232
Приложение №3 ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДВИЖУЩИЙСЯ ЗАРЯД. СИЛА ЛОРЕНЦА.....	234
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ [1]. Кроссворды для повторения.....	237
Кроссворд №4 «ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОСТАТИКИ»	238
Кроссворд №5 «ПОСТОЯННЫЙ ТОК» (ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ)	240
Кроссворд №6 «ПОСТОЯННЫЙ ТОК» (В НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СРЕДАХ).....	242
Кроссворд №7 «МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ».....	244
Решение кроссвордов.....	246
Раздел 3. СВЕТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ... ..	247
Глава 7. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА.....	248
ПРЕДИСЛОВИЕ.....	248
§ 62. ИСТОЧНИКИ СВЕТА. РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА.....	249
§ 63. ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА. ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА.....	255
§ 64. ЗЕРКАЛА ПЛОСКИЕ, ВОГНУТЫЕ И ВЫПУКЛЫЕ.....	259
§ 65. ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА. ЗАКОН ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА.....	265
§ 66. ЛИНЗЫ. ОПТИЧЕСКАЯ СИЛА ЛИНЗЫ.....	273
§ 67. ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ДАВАЕМЫХ ЛИНЗОЙ.....	277
Приложение №1. ЧТО ТАКОЕ МИРАЖИ?.....	284
Приложение №2. ГЛАЗ И ЗРЕНИЕ.....	285
Приложение №3. ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ.....	291
ДОПОЛНЕНИЕ К ГЛАВЕ 7. СВЕДЕНИЯ ИЗ ФОТОМЕТРИИ.....	300
СВЕТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ Кроссворды для повторения.....	305

Кроссворд №8 «ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ».....	306
Кроссворд №9 «ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ».....	308
Решение кроссвордов.....	310