

4. Определите предельный угол полного отражения α_2 на границе вещества со стеклом (показатель преломления стекла $n = 1,42$), если на границе этого вещества с воздухом ($n_{\text{в}} = 1,0$) предельный угол полного отражения $\alpha_1 = 45^\circ$.
5. Определите угол падения α луча света из воздуха на поверхность стекла с показателем преломления $n = 1,6$, если угол преломления этого луча $\gamma = 29^\circ$.
6. Определите угол падения α на плоскую границу раздела двух сред с показателями преломления $n_1 = 1,5$ и $n_2 = 1,7$, если луч отраженный перпендикулярен лучу преломленному.
7. Свет распространяется вдоль оптического волокна с показателем преломления $n_1 = 1,60$. Определите показатель преломления n_2 оболочки, если предельный угол полного отражения равен $\alpha_{\text{пр}} = 85,0^\circ$.



§ 20. Прохождение света через оптические элементы

- Законы отражения и преломления света широко используются для управления ходом световых пучков. Для отражения света в приборах применяются зеркала и призмы, для преломления — призмы, плоскопараллельные пластинки (рис. 137), линзы. Зеркала, призмы, пластинки и линзы являются элементами, комбинируя которые создают различные оптические приборы. Как они работают?

Рассмотрим отдельные элементы оптических приборов.

Плоскопараллельная пластинка

Рассмотрим ход светового луча от источника в плоскопараллельной пластинке толщиной d , находящейся в воздухе (рис. 138, а). Согласно закону преломления на первой и второй границах

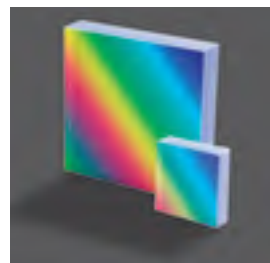


Рис. 137. Плоскопараллельные пластинки



Рис. 138. а — световой луч, проходящий через плоскопараллельную пластинку;
б — ход луча в пластинке

раздела для луча, падающего под углом α на первую границу, имеем (рис. 138, б):

$$\sin \alpha = n \sin \gamma, \quad n \sin \alpha_1 = \sin \gamma_1.$$

Здесь γ — угол преломления на первой границе, α_1 — угол падения на вторую границу, γ_1 — угол преломления на второй границе, n — абсолютный показатель преломления вещества пластинки.

Накрест лежащие углы γ и α_1 при параллельных прямых AD и BK (перпендикулярах к первой и второй параллельным границам) равны, т. е. $\alpha_1 = \gamma$. Следовательно, $\sin \alpha = n \sin \gamma = n \sin \alpha_1 = \sin \gamma_1$. Откуда следует, что:

$$\alpha = \gamma_1. \quad (1)$$

Таким образом, *луч света, проходя через плоскопараллельную пластинку, с обеих сторон которой находится одна и та же среда, смещается на некоторое расстояние $h = BC$ перпендикулярно своему начальному направлению* (см. рис. 138, б).

Соответственно, все предметы, если смотреть на них сквозь прозрачную плоскопараллельную пластинку под углом, не равным нулю, будут также казаться смещенными.

Как видно из рисунка 138, а, лучи, отраженные от верхней и нижней граней пластинки, параллельны друг другу на выходе из нее.



► На рисунке 139 изображена трехгранная призма. Луч света, проходя через трехгранную призму, отклоняется от своего начального направления распространения к основанию (утолщенной части) призмы. Подчеркнем, что это справедливо в том случае, если абсолютный показатель преломления вещества призмы больше абсолютного показателя преломления окружающей среды ($n_2 > n_1$).

Обратите внимание, что если на призму падает луч белого света, то после прохождения призмы на экране наблюдается разноцветная полоска, содержащая набор цветов — от красного до фиолетового. Исаак Ньютон, впервые проделавший данный эксперимент, назвал эту полоску спектром. Порядок следования цветов в спектре легко запомнить с помощью известной фразы:

красный — 770—630 нм	каждый
оранжевый — 630—590 нм	охотник
желтый — 590—570 нм	желает
зеленый — 570—495 нм	знать,
голубой, синий — 495—435 нм	где сидят
фиолетовый — 435—390 нм	фазаны



Рис. 139. Преломление лучей в призме



1. Нарисуйте ход светового луча в плоскопараллельной пластинке.
2. При каком угле падения луч света, проходя через плоскопараллельную пластинку, не смещается?

Упражнение 16



1. Определите показатель преломления пластинки, исходя из хода лучей на рисунке 140. Окружающая среда — воздух ($n = 1,0$).

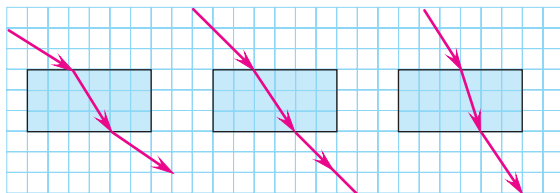


Рис. 140

2. Определите показатель преломления пластинки, исходя из хода лучей на рисунке 141, если показатель преломления окружающей среды $n = 2,0$.

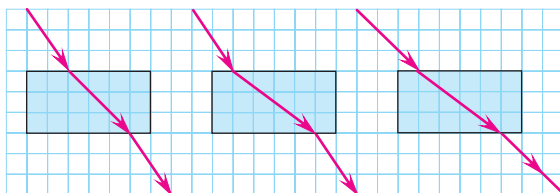


Рис. 141

3. Постройте ход луча в пластинках из стекла с показателем преломления $n = 1,5$ (рис. 142, 143), если угол $\theta = 45^\circ$.

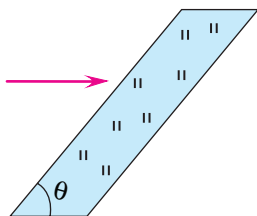


Рис. 142

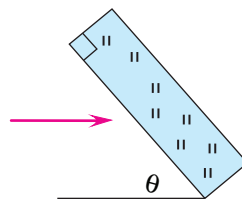


Рис. 143

4. Угол падения двух параллельных лучей света из воздуха на плоскопараллельную стеклянную пластинку ($n = 1,6$) равен $\alpha = 30^\circ$, а расстояние между ними $l_0 = 20$ мм. Определите расстояние l между лучами в пластинке.



§ 21. Формула тонкой линзы

- Одним из простейших оптических приборов является тонкая линза (рис. 144), которая широко используется как для исправления дефектов зрения, так и для получения оптических изображений. Какие изображения дает тонкая линза? Как связаны между собой расстояние от предмета до тонкой линзы и расстояние от линзы до изображения?



Рис. 144. Линзы



Линза называется собирающей, если после преломления в ней параллельный пучок становится сходящимся (рис. 145, а). Если же после преломления в линзе параллельный пучок становится расходящимся, то линза называется рассеивающей (рис. 145, б).

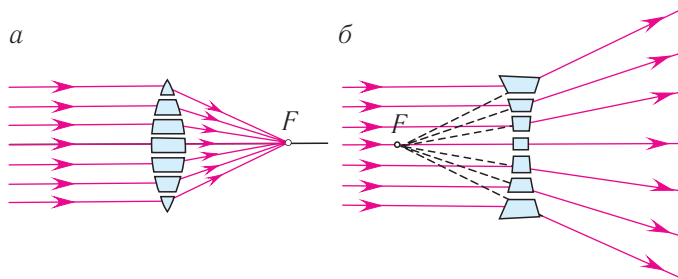


Рис. 145. Модель линзы: а — двояковыпуклой; б — двояковогнутой

Величина, обратная фокусному расстоянию линзы, выраженному в метрах, называется ее оптической силой: $D = \frac{1}{F}$.

Единица оптической силы — диоптрия (1 дптр). 1 дптр соответствует оптической силе линзы с фокусным расстоянием $F = 1$ м; $1 \text{ дптр} = 1 \text{ м}^{-1}$.

Линзы можно представить в виде совокупности трехгранных призм. На рисунке 145 изображена модель двояковыпуклой линзы, собранной из призм, повернутых основаниями к центру линзы (см. рис. 145, а). Соответственно, модель двояковогнутой линзы будет представлена призмами, повернутыми основаниями от центра линзы (см. рис. 145, б). Преломляющие углы этих призм можно подобрать таким образом, чтобы падающие на нее параллельные лучи после преломления в призмах собрались в одной точке F (см. рис. 145, 146).

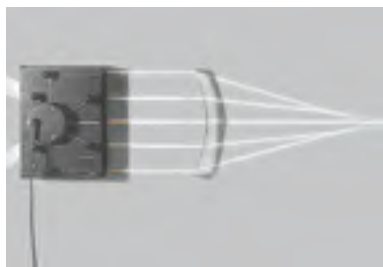


Рис. 146. Ход лучей в собирающей линзе

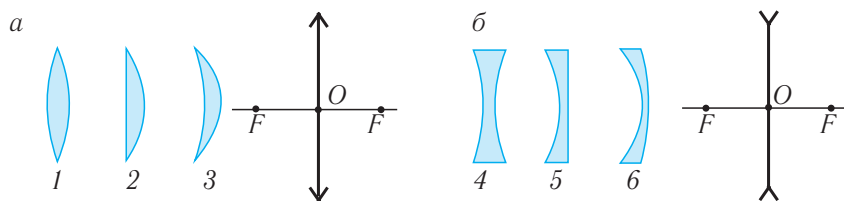


Рис. 147. Типы линз и их условные обозначения: *а* — собирающие: 1 — двояковыпуклая; 2 — плосковыпуклая; 3 — вогнуто-выпуклая; *б* — рассеивающие: 4 — двояковогнутая; 5 — плосковогнутая; 6 — выпукло-вогнутая

Линза считается **тонкой**, если ее толщина в центре намного меньше радиусов ограничивающих ее поверхностей. Тонкая линза дает неискаженное изображение только в том случае, если свет монохроматический и предмет достаточно мал, следовательно, лучи распространяются вблизи главной оптической оси.

Отметим условия, при *одновременном* выполнении которых линза является **собирающей** (рис. 147, *а*):

- *толщина в центре больше толщины у краев;*
- *ее показатель преломления больше показателя преломления окружающей среды.*

При невыполнении (или выполнении) *только одного* из этих условий линза является **рассеивающей** (рис. 147, *б*):

Рассмотрим **основные характеристики линзы** (рис. 148, *а, б*).

Прямая линия, на которой лежат центры обеих сферических поверхностей линзы, называется **главной оптической осью**.

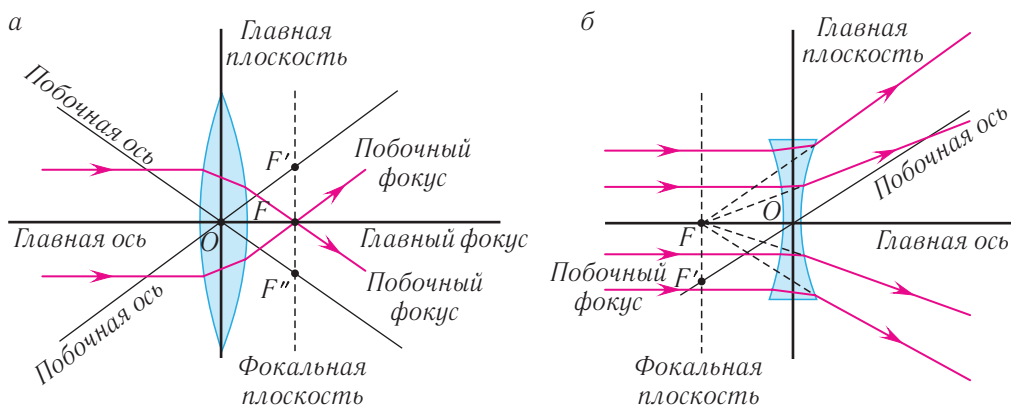


Рис. 148. Основные характеристики линз:
а — собирающая линза; *б* — рассеивающая линза

Точка линзы, проходя через которую луч не преломляется, называется **оптическим центром**.

Прямая линия, проходящая через оптический центр линзы, не совпадающая с главной оптической осью, называется **побочной оптической осью**. Каждая линза имеет только одну главную оптическую ось и бесконечно много побочных осей.

Плоскость, проходящая через оптический центр тонкой линзы перпендикулярно главной оптической оси, называется **главной плоскостью** линзы.

Точка, в которую собирается узкий пучок света после преломления в линзе, распространяющийся параллельно главной оптической оси, называется **главным фокусом F** линзы. Расстояние OF от оптического центра линзы до ее главного фокуса называется **фокусным расстоянием** линзы.

Плоскость, проходящая через главный фокус перпендикулярно главной оптической оси, называется **фокальной плоскостью**. Фокальная плоскость собирающей линзы является геометрическим местом точек, в которых пересекаются параллельные лучи, падающие на линзу под любым углом к главной оптической оси. Поэтому пучок света, направленный на собирающую линзу параллельно побочной оптической оси, собирается в **побочном фокусе**.

Построение изображений

Обычно для построений в линзах используют три **характерных (стандартных) луча** (рис. 149, а, б):

луч (1), идущий через оптический центр линзы, не испытывает преломления;

луч (2), параллельный главной оптической оси, после преломления проходит через главный фокус;

луч (3), проходящий через главный фокус, после преломления идет параллельно главной оптической оси.

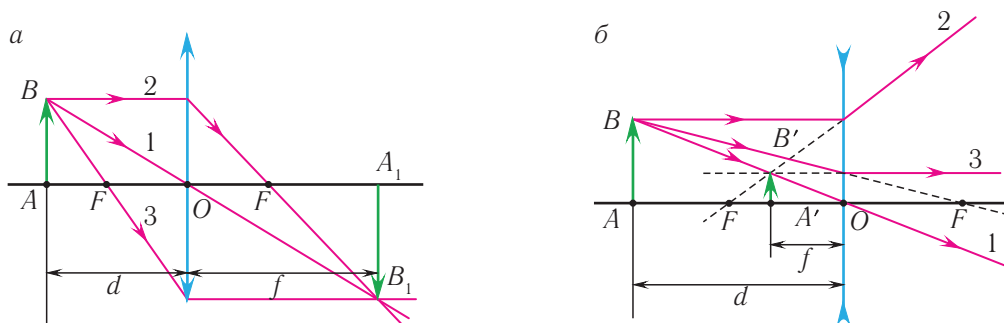


Рис. 149. Стандартные лучи для построения в линзах: а — собирающая линза;

б — рассеивающая линза

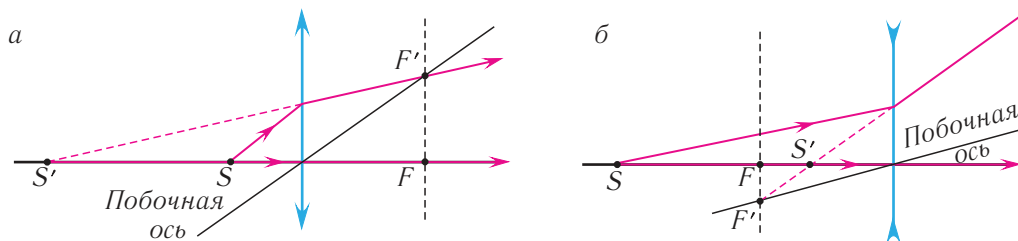


Рис. 150. Построение изображения с помощью побочной оптической оси:
а — собирающая линза; б — рассеивающая линза

Для построения изображения в линзе достаточно построить ход двух лучей от каждой точки предмета (см. рис. 149). Изображение находится в месте пересечения лучей после преломления на поверхностях линзы (действительное изображение) или в месте пересечения продолжений лучей (мнимое изображение).

Отметим, что если предмет AB расположен перпендикулярно главной оптической оси, то и его изображение A_1B_1 будет перпендикулярно этой оси. Поэтому достаточно построить только изображение A_1 точки A предмета, а изображение B_1 точки B находим, опуская перпендикуляр из точки B_1 на главную оптическую ось (см. рис. 149).

Для построения изображения точки, находящейся на главной оптической оси, кроме луча, проходящего через центр линзы, используют луч, падающий на нее параллельно какой-либо побочной оптической оси (рис. 150). Этот луч после преломления в линзе пройдет через побочный фокус F' , лежащий на побочной оси. Такие построения приведены для собирающей и рассеивающей линз на рисунке 150. На рисунке 151 приведен пример построения области видения предмета S в тонкой линзе.

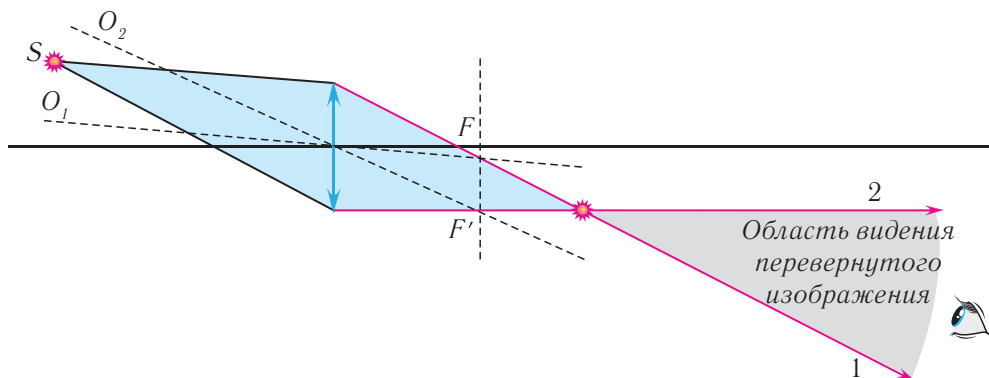


Рис. 151. Построение изображения в собирающей линзе и область видения

Характеристики изображений

В зависимости от типа линзы и расстояния до нее можно получать изображения: *увеличенные и уменьшенные, прямые и обратные (перевернутые), действительные и мнимые* (рис. 152).

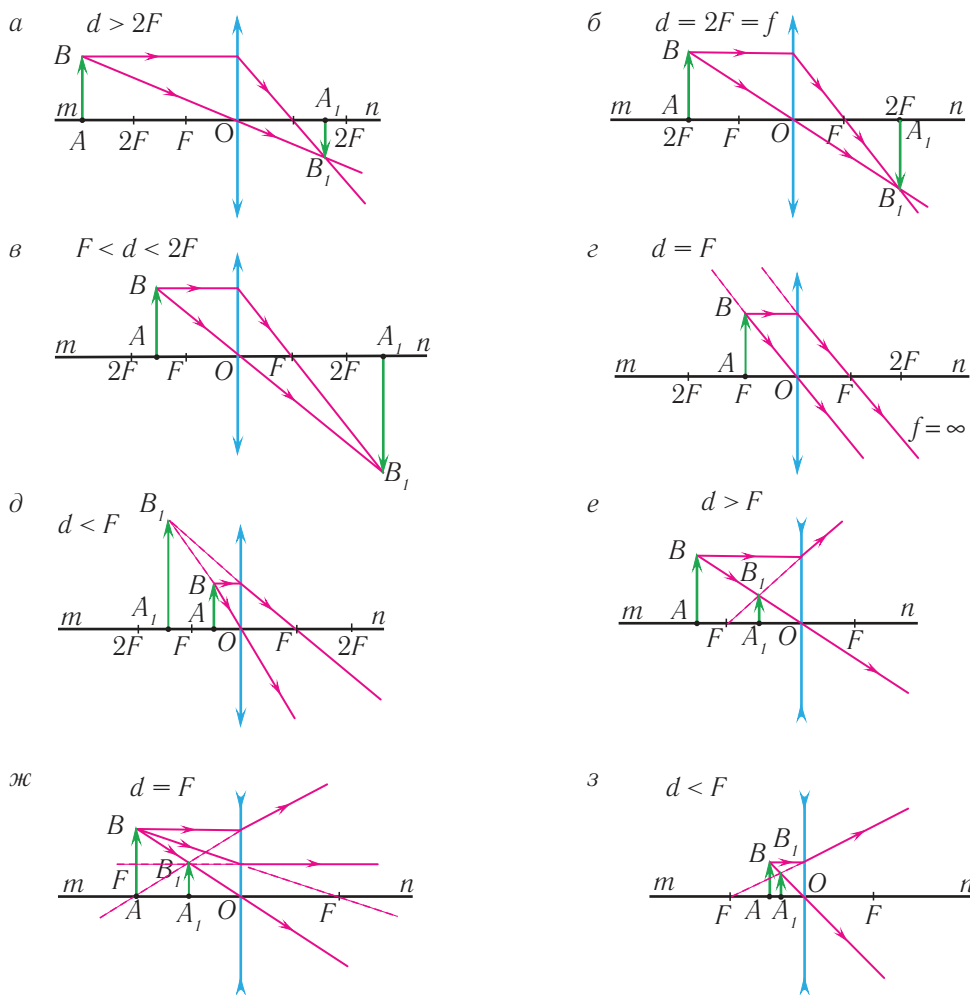


Рис. 152. Построения в тонких линзах: *а* — изображение действительное, обратное, уменьшенное; *б* — изображение действительное, обратное, в натуральную величину; *в* — изображение действительное, обратное, увеличенное; *г* — изображение отсутствует (на бесконечности); *д* — изображение мнимое, прямое, увеличенное; *е* — изображение мнимое, прямое, уменьшенное; *ж* — изображение мнимое, прямое, уменьшенное в 2 раза; *з* — изображение мнимое, прямое, уменьшенное

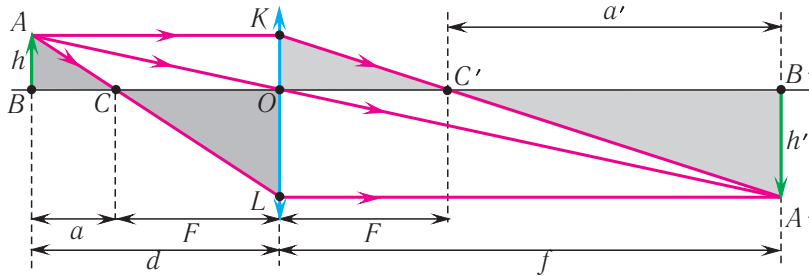


Рис. 153. К выводу формулы линзы

Между фокусным расстоянием тонкой линзы, расстоянием от предмета до линзы и от линзы до изображения существует определенная количественная зависимость, называемая **формулой тонкой линзы**.

Выведем формулу тонкой линзы из геометрических соображений, рассматривая ход характерных лучей: луча, идущего через оптический центр O линзы, луча, параллельного главной оптической оси линзы, и луча, проходящего через главный фокус линзы.

Построим изображение предмета AB в тонкой собирающей линзе (рис. 153). Пусть расстояние от предмета до линзы d , расстояние от линзы до изображения f , фокусное расстояние линзы F , расстояние от предмета до переднего главного фокуса a , расстояние от заднего главного фокуса до изображения a' , высота предмета h , высота его изображения h' .

Из рисунка 153 видно, что $\triangle ABC \sim \triangle CLO$, $\triangle A'B'C' \sim \triangle KOC'$, $\triangle ABO \sim \triangle A'B'O$. Из подобия треугольников следует:

$$\frac{h}{a} = \frac{h'}{F}; \quad (1)$$

$$\frac{h'}{a'} = \frac{h}{F}; \quad (2)$$

$$\frac{h}{d} = \frac{h'}{f}. \quad (3)$$

Используя соотношения (1) и (2), получим:

$$aa' = F^2. \quad (4)$$

С учетом того что $d = a + F$, $f = a' + F$ (см. рис. 153), находим $a = d - F$ и $a' = f - F$ и подставляем в формулу (4):

$$(d - F)(f - F) = df - Ff - dF + F^2 = F^2.$$

Откуда получаем $df = Ff + dF$.

Разделив обе части последнего выражения на dfF , получаем **формулу тонкой линзы**:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}. \quad (5)$$

Для практического использования формулы линзы следует твердо запомнить **правило знаков**:

для собирающей линзы, действительного источника и действительного изображения величины F , d , f считают *положительными*. Для рассеивающей линзы, мнимого источника и мнимого изображения — F , d , f считают *отрицательными*.

Заметим, что предмет или источник является *мнимым* только в том случае, если на линзу падает пучок сходящихся лучей.

Таким образом, линза с $F > 0$ является **собирающей** (положительной), а с $F < 0$ — **рассеивающей** (отрицательной).

Линейным (поперечным) увеличением Γ называется отношение линейного размера изображения h' к линейному размеру предмета h . Из соотношения (3) находим линейное увеличение тонкой линзы:

$$\Gamma = \frac{h'}{h} = \frac{f}{d}. \quad (6)$$

Поскольку оптическая сила линзы зависит от свойств окружающей среды, то под водой без плавательных очков мы видим плохо.

В современных оптических приборах для улучшения качества изображений используются **системы линз**. Оптическая сила D системы тонких линз, сложенных вместе, равна сумме их оптических сил D_i :

$$D = D_1 + D_2 + \dots + D_n. \quad (7)$$



1. Что называют оптической силой линзы? В каких единицах она измеряется?
2. Что называют главной оптической осью линзы? Побочной осью?
3. Что называют главным фокусом линзы? Фокусным расстоянием?
4. По какой формуле определяется поперечное увеличение линзы?
5. Как известно, световые лучи обратимы. Как это утверждение можно применить при использовании формулы тонкой линзы?
6. Какие изображения может дать собирающая линза? Рассеивающая?
7. По какой формуле определяется оптическая сила системы тонких линз?

8. Определите, как изменяется положение изображения и его линейное увеличение при перемещении предмета вдоль главной оптической оси собирающей (рассеивающей) линзы от оптического центра до бесконечности.
9. Может ли рассеивающая линза дать действительное изображение?

Пример решения задачи:

На каком расстоянии d от рассеивающей линзы с оптической силой $D = -4$ дптр надо поместить предмет, чтобы его мнимое изображение получилось в $k = 5$ раз меньше ($\Gamma = \frac{1}{5}$) самого предмета? Постройте изображение предмета.

Дано:

$$D = -4 \text{ дптр}$$

$$\Gamma = \frac{1}{5}$$

$$d = ?$$

Решение

Из формулы для линейного увеличения:

$$\frac{h'}{h} = \frac{f}{d} = \Gamma$$

находим:

$$f = \Gamma d.$$

По формуле тонкой линзы (рис. 154) в соответствии с правилом знаков:

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = \frac{1}{F} = D$$

с учетом выражения для f получаем:

$$d = \frac{1 - \frac{1}{\Gamma}}{D}, \quad d = \frac{1 - \frac{1}{5}}{-4 \text{ м}^{-1}} = \frac{1 - 5}{-4} \text{ м} = 1 \text{ м}.$$

Ответ: $d = 1 \text{ м}$.

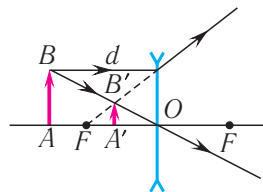


Рис. 154

Упражнение 17

1. Постройте изображение предмета AB в тонких собирающей и рассеивающей линзах (рис. 155, 156). Какое это изображение?
2. Определите построением положение фокусов тонкой линзы, если задана главная оптическая ось и ход произвольного луча ABC (рис. 157).

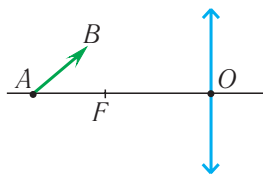


Рис. 155

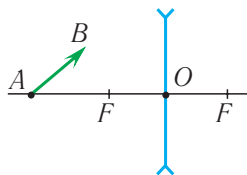


Рис. 156

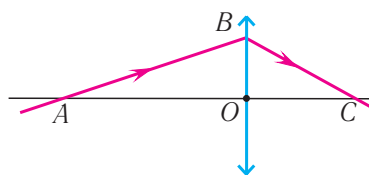


Рис. 157

3. Заполните таблицу классификации изображений, даваемых тонкой линзой в различных случаях.

d	f	Γ	Вид изображения	Формула линзы
Собирающая линза				
$d > 2F$				
$d = 2F$				
$F < d < 2F$				
$d = F$				
$d < F$				
Рассеивающая линза				

- Изображение предмета, находящегося на расстоянии $d = 32,0$ см перед тонкой линзой, расположено на расстоянии $f = 43,0$ см за линзой. Какая эта линза и чему равно ее фокусное расстояние F ?
- Фокусное расстояние тонкой собирающей линзы $F = 15$ см. Где расположен точечный источник света, если его действительное изображение получается на экране на расстоянии $f = 40$ см от линзы и удалено на $H = 3,0$ см от ее главной оптической оси?
- Тонкая линза с фокусным расстоянием $F = 12$ см дает действительное изображение на расстоянии $f = 20$ см от линзы. Определите расстояние d , на котором расположен предмет, и найдите увеличение Γ линзы.
- Оптическая сила тонкой линзы $D = 13\frac{1}{3}$ дптр. Где надо поместить предмет, чтобы получить мнимое изображение на расстоянии $f = 25$ см от линзы?

