



## § 36.

### Преломление света



Рис. 250

Почему ноги человека, зашедшего в воду, кажутся короче (рис. 250)? Дно бассейна мы видим ближе к поверхности, чем есть в действительности. Ложка в стакане на уровне поверхности воды (рис. 251) кажется переломленной. Как объяснить эти явления?

Когда пучок света падает на границу раздела двух прозрачных сред, часть его отражается, а часть переходит в другую среду, изменяя свое направление (рис. 252).

**Изменение направления распространения света при переходе его через границу раздела двух сред называется преломлением.**

Каким законам подчиняется преломление света?

Рассмотрим опыт. В центре оптического диска закрепим стеклянный полудиск (рис. 253), направим на него узкий пучок света (луч 1). Луч 3 — преломленный луч.

**Угол  $\gamma$  между перпендикуляром, проведенным в точку падения к границе раздела двух сред, и преломленным лучом называется углом преломления.**

Сравнив углы  $\alpha$  и  $\gamma$  (рис. 253), мы видим, что угол преломления  $\gamma$  меньше угла падения  $\alpha$ .



Рис. 251

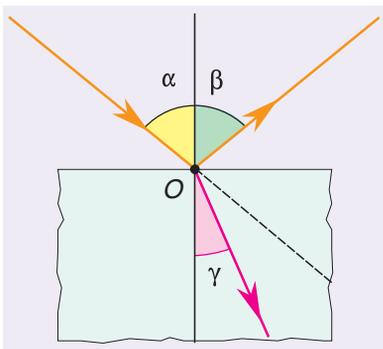


Рис. 252

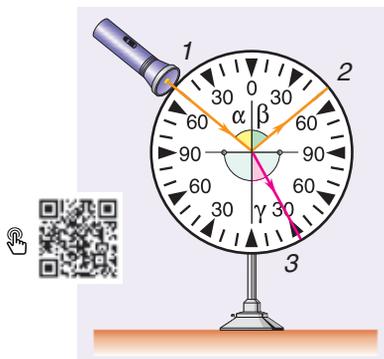


Рис. 253

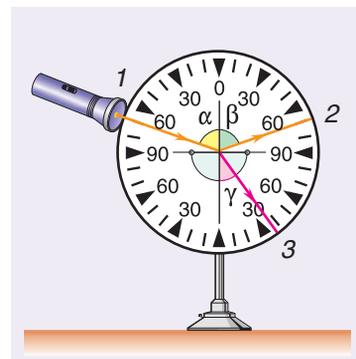


Рис. 254

Увеличим угол падения  $\alpha$  (рис. 254). Угол преломления  $\gamma$  тоже увеличивается, но он по-прежнему меньше угла падения ( $\gamma < \alpha$ ).

Если стекло заменить водой и пустить световой луч под тем же углом  $\alpha$  (рис. 255, а), что и на стеклянный полудиск, то угол преломления  $\gamma$  в воде будет несколько больше, чем в стекле, но меньше угла падения:  $\gamma < \alpha$ . Сравним скорости света в воздухе, воде и стекле:  $v_{\text{возд}} > v_{\text{в}} > v_{\text{ст}}$ , т. е. стекло оптически более плотная среда, чем вода, а вода — чем воздух. Следовательно, при переходе луча из оптически менее плотной в оптически более плотную среду угол преломления меньше угла падения.

А если луч переходит из воды в воздух?

Из опыта (рис. 255, б) видно, что угол  $\gamma$  больше угла  $\alpha$ . Значит, если свет переходит из среды оптически более плотной в оптически менее плотную, то угол преломления больше угла падения. Этот вывод логически следует из свойства обратности, которое характерно не только для падающего и отраженного лучей, но и для падающего и преломленного лучей.

Из результатов проведенных опытов следует.

1. Луч падающий и луч преломленный лежат в одной плоскости с перпендикуляром, проведенным в точке падения луча к границе раздела двух сред.

2. Угол преломления меньше угла падения при переходе луча из оптически менее плотной среды в оптически более плотную среду. Угол преломления больше угла падения, если луч переходит из оптически более плотной среды в оптически менее плотную.

Эти два главных положения выражают суть явления преломления света. Однако, когда луч падает перпендикулярно на границу раздела двух сред ( $\alpha = 0^\circ$ ), он не испытывает преломления, что можно подтвердить опытом (рис. 256).

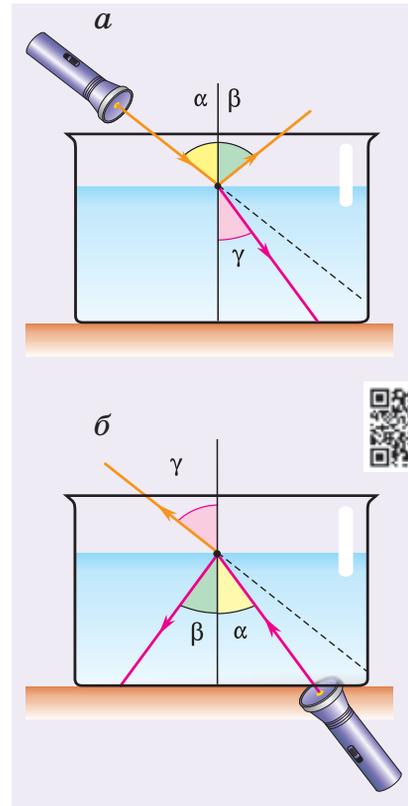


Рис. 255

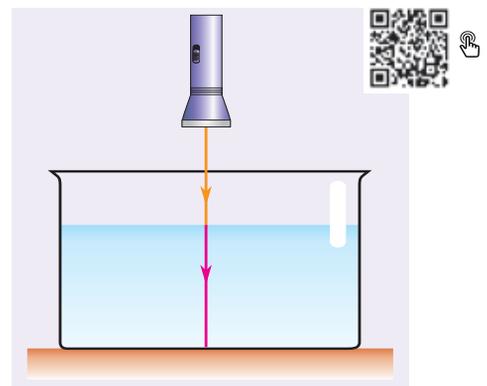


Рис. 256

### ■ Главные выводы

1. При переходе из одной среды в другую световой луч на границе раздела сред в большинстве случаев испытывает преломление (изменяет направление).
2. Луч, падающий перпендикулярно к границе раздела двух сред ( $\alpha = 0^\circ$ ), не испытывает преломления.
3. Если луч переходит из оптически менее плотной среды в оптически более плотную, угол преломления меньше угла падения ( $\gamma < \alpha$ ). При переходе луча из оптически более плотной среды в менее плотную угол преломления больше угла падения ( $\gamma > \alpha$ ).

### ? Контрольные вопросы

1. Какие явления происходят со световым лучом на границе раздела двух сред?
2. Как зависит угол преломления луча при переходе из одной среды в другую от скорости распространения света в них?
3. Может ли угол преломления быть больше угла падения? В каких случаях?
4. Возможен ли переход луча света из одной среды в другую без преломления? Ответ прокомментируйте.
5. В каких пределах может изменяться угол преломления при переходе луча из воды в воздух? Почему?

### ➔ Домашнее задание

Для наблюдения из окопа за событиями, происходящими на поверхности земли, используют перископ (от греч. *periskopéō* — смотрю вокруг). Простейшая схема зеркального перископа показана на рисунке 257. Объясните действие перископа. Сконструируйте дома перископ и наблюдайте, сидя на полу, за тем, что происходит за окном.

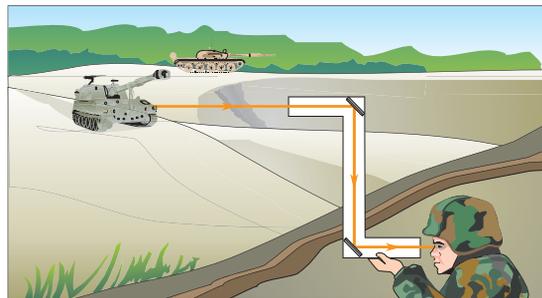


Рис. 257

## Упражнение 24

1. Изобразите примерный ход преломленного луча в данных средах (рис. 258), луч  $1$  — падающий.

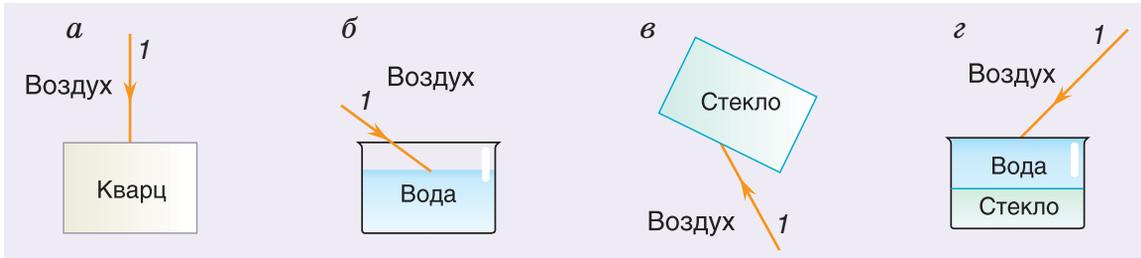


Рис. 258

2. Луч света падает из воздуха под одним и тем же углом на поверхности воды, стекла и алмаза. Для какой из сред угол преломления будет наибольшим? Наименьшим? Покажите это на чертеже.

3. По каким направлениям надо пустить лучи в алмазе, стекле и воде, чтобы вышедшие из них в воздух лучи (рис. 259) оказались параллельными? Покажите на чертеже в тетради.

4. Как изменится ширина пучка параллельных лучей после преломления его на границе сред воздух — вода? Сделайте чертеж, поясняющий ответ.

5. Пластинка из стекла прижата к пластинке из сапфира. На границу их раздела падают лучи  $1$  и  $2$ . Направление распространения луча  $1$  в стекле и сапфире показано на рисунке 260. Покажите примерный ход преломленного луча  $2$  в стекле. Ответ поясните.

 6. Человеку, стоящему на берегу, кажется, что ноги человека, зашедшего в воду, стали короче. Объясните с помощью чертежа этот оптический обман.

 7. Два мальчика, один из которых находится под водой, а другой — на берегу, определяют «на глаз» высоту Солнца над горизонтом. Какому из них Солнце будет казаться ниже?



Рис. 259

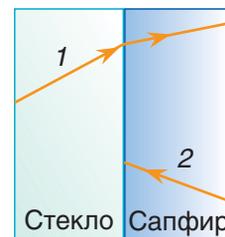


Рис. 260



## § 37.

### Линзы. Оптическая сила линзы

Многие люди носят очки. А задумывались ли вы над вопросами: что собой представляют стекла очков и какова их роль? Стекла очков есть не что иное, как линзы. Практически ни один оптический прибор (от простой лупы до сложных телескопов) не обходится без линз. Что же такое линза?

**Линза представляет собой прозрачное тело, ограниченное криволинейными (чаще всего сферическими) или криволинейной и плоской поверхностями.** Материалом для линз обычно служит оптическое или органическое стекло.

На рисунках 261, 262 представлены сечения линз двух типов: *двояковыпуклой* (рис. 261) и *двояковогнутой* (рис. 262). Одна из поверхностей линзы может быть плоской, как, например, на рисунке 263. Такие линзы называются *плосковыпуклая* (рис. 263, а) и *плосковогнутая* (рис. 263, б). Прямая, проходящая через центры  $C_1$  и  $C_2$  сферических поверхностей (рис. 264), называется *главной оптической осью линзы*. Радиусы  $R_1$  и  $R_2$  есть радиусы кривизны поверхностей линзы (рис. 264).

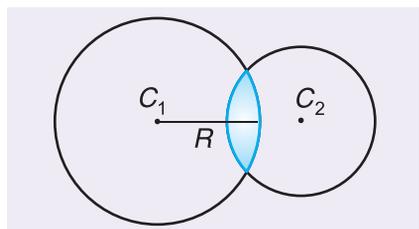


Рис. 261

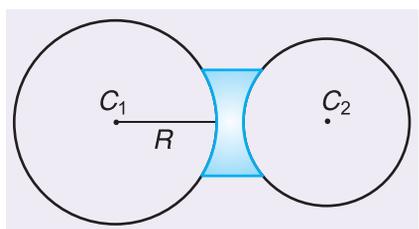


Рис. 262

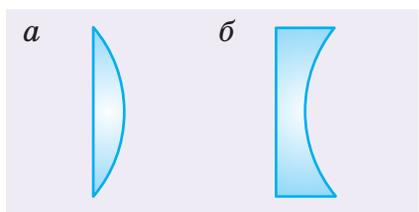


Рис. 263

Если толщина линзы мала по сравнению с радиусами  $R_1$  и  $R_2$  кривизны ее поверхностей (рис. 264), то линза называется *тонкой*. Ее часто изображают  $\updownarrow$  или  $\lambda$ . Всякая тонкая линза имеет точку, проходящую через которую, луч не меняет своего направления (лучи 1 и 2 на рисунке 264). Эта точка  $O$  называется *оптическим центром линзы*. В дальнейшем мы будем рассматривать только тонкие линзы, изготовленные из вещества, оптически более плотного, чем среда (воздух), в которой они находятся.

Как линзы меняют направление падающих на них лучей после преломления? Ответ получим с помощью опыта.

Направим на двояковыпуклую линзу (рис. 265, а) параллельно главной оптической оси лучи света. После преломления в линзе они пересекают главную оптическую ось в одной точке  $F$ . Значит,

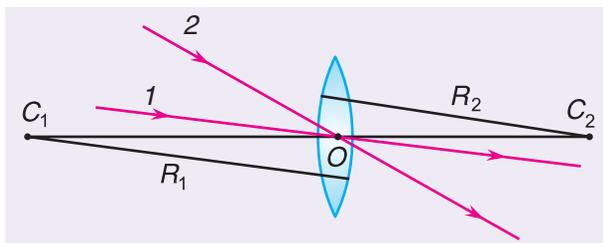


Рис. 264

двояковыпуклая линза собирает преломленные лучи, поэтому такая линза называется **собирающей**. Также превращают параллельный пучок в сходящийся линзы 2, 3, изображенные на рисунке 270 (с. 147). При замене линзы на двояковогнутую (рис. 265, б) лучи после преломления в линзе расходятся, а центральный луч, как и в первом случае, не испытывает преломления. Итак, двояковогнутая линза рассеивает параллельный пучок падающих на нее лучей, поэтому такая линза называется **рассеивающей**. Рассеивают параллельный пучок и линзы 5, 6 (см. рис. 270).

Точка  $F$  (рис. 265, а, рис. 266, а), в которой пересекаются преломленные линзой лучи, падающие параллельно главной оптической оси, или их продолжения (рис. 265, б, рис. 266, б), называется **главным фокусом линзы**. Так как параллельные лучи можно пустить как с одной, так и с другой стороны линзы, то и главных фокуса у линзы два. Оба фокуса лежат на главной оптической оси симметрично относительно оптического центра линзы (рис. 266). А в какой точке собирает линза лучи, идущие под углом к главной оптической оси? Оказывается, в точке  $F_1$ , которая находится в плоскости  $A-A_1$  (рис. 266, а), проходящей через главный фокус перпендикулярно главной оптической оси. Эта плоскость называется **фокальной плоскостью**, а точка  $F_1$ , в отличие от главного фокуса, называется **фокусом**.

Обратите внимание, что у собирающей линзы в фокусе пересекаются сами *преломленные лучи*, несущие энергию, поэтому фокус называется **действительным**. У рассеивающей линзы в фокусе пересекаются *продолжения преломленных лучей*. Такой фокус называют **мнимым**.

**Расстояние от оптического центра до главного фокуса называется фокусным расстоянием.** Его тоже принято обозначать буквой  $F$ .

Линза, имеющая более выпуклые поверхности, преломляет лучи сильнее. Линза 1 (рис. 267, а) преломляет лучи сильнее, чем линза 2 (рис. 267, б). Фокусное расстояние  $F_1$  у линзы 1 меньше, чем  $F_2$  у линзы 2.

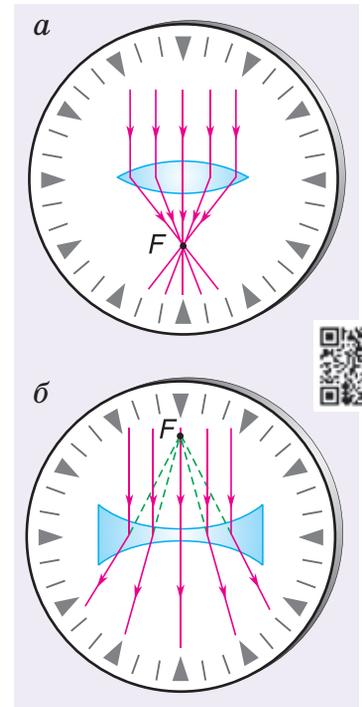


Рис. 265

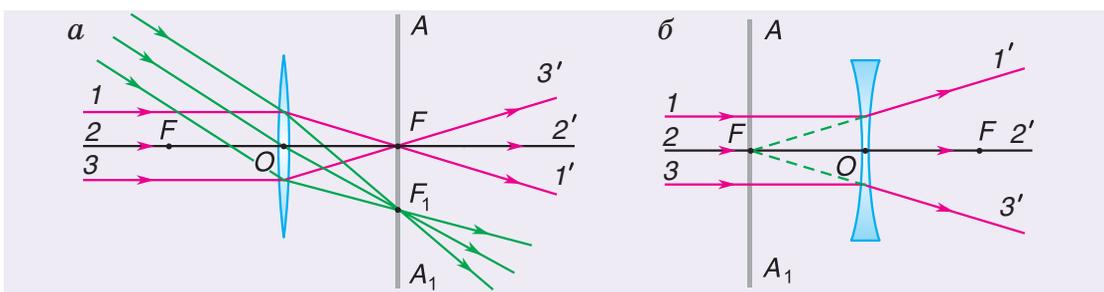


Рис. 266

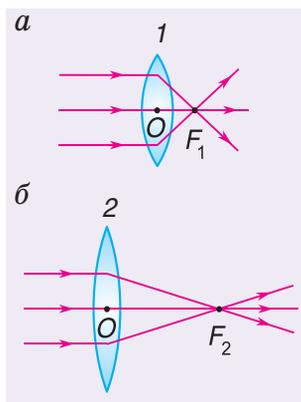


Рис. 267

Чтобы количественно оценить преломляющую способность линзы, введем величину, обратную фокусному расстоянию, и назовем ее **оптической силой линзы** (обозначается буквой  $D$ ):

$$D = \frac{1}{F}.$$

Основной единицей измерения оптической силы линзы в СИ является **диоптрия** (сокращенно **дптр**). Очевидно, что  $D = 1$  дптр, если фокусное расстояние линзы  $F = 1$  м.

А как оценивается оптическая сила рассеивающей линзы, у которой фокус мнимый? В этом случае фокусное расстояние считается отрицательным, а следовательно, и оптическая сила — отрицательной величиной.

Например, если  $F = -0,5$  м, то оптическая сила

$$D = \frac{1}{-0,5 \text{ м}} = -2 \text{ дптр}.$$

Теперь для вас не будет загадкой рекомендация врача-окулиста: «Вам нужны очки со стеклами +1,5 диоптрии (или -2 диоптрии)».

### ▼ Для любознательных

Не следует думать, что любая линза с выпуклой поверхностью будет обязательно собирающей, а с вогнутой — рассеивающей. Собирающей является всякая линза, у которой середина толще краев (например, линзы 1, 2, 3 на рисунке 270), а рассеивающей — линза, у которой середина тоньше краев (рис. 270, линзы 4, 5, 6). И не забывайте, что все наши рассуждения справедливы, если вещество линзы (стекло) имеет большую оптическую плотность, чем окружающая среда (воздух).

В природе собирающими линзами являются капельки росы, в быту — наполненные водой прозрачные сосуды — кувшин, пластиковая бутылка. Подумайте и ответьте, какие это линзы.

### ▼ Для любознательных

В Беларуси предприятия, входящие в холдинг «БелОМО», специализируются на разработке и выпуске оптических деталей для широкого профиля приборов: наблюдательных (биноклей, прицелов), медицинского оборудования, космической техники. Инновационная продукция холдинга экспортируется более чем в 30 стран мира.

## □ Главные выводы

1. Линзы меняют направление падающих на них лучей после преломления, за исключением тех, которые проходят через оптический центр линзы.
2. Собирающая линза после преломления делает параллельный пучок лучей сходящимся, рассеивающая линза — расходящимся.
3. Лучи, идущие параллельно главной оптической оси, после преломления в собирающей линзе пересекаются в главном фокусе. В рассеивающей линзе в главном фокусе пересекаются продолжения преломленных лучей.
4. Величина, обратная фокусному расстоянию, определяет оптическую силу линзы.

## ? Контрольные вопросы

1. Какую линзу называют тонкой?
2. Каким особым свойством обладает оптический центр тонкой линзы?
3. Как ведет себя параллельный пучок лучей, прошедший через: а) собирающую линзу; б) рассеивающую линзу?
4. Почему у собирающей линзы фокус называют действительным, а у рассеивающей — мнимым?
5. Как зависит оптическая сила линзы от фокусного расстояния?

## Упражнение 25

1. Определите оптическую силу линзы, фокусное расстояние которой: а)  $F = 20$  см; б)  $F = -0,25$  м.

2. Для данных линз (рис. 268, а, б) покажите ход лучей 1, 2 после преломления линзами.

3. Покажите ход лучей, падающих на тонкие собирающую и рассеивающую линзы (рис. 269, а, б).

4. По форме ограничивающих поверхностей сферические линзы можно разделить на 6 типов (рис. 270). С линзами 1, 2, 4, 5 вы уже знакомы. Линза 3 — вогнуто-выпуклая, линза 6 — выпукловогнутая. Какие из линз имеют положительную оптическую силу? Какие отрицательную? При каких условиях?

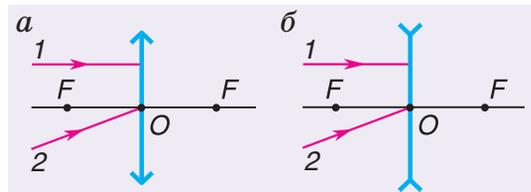


Рис. 268

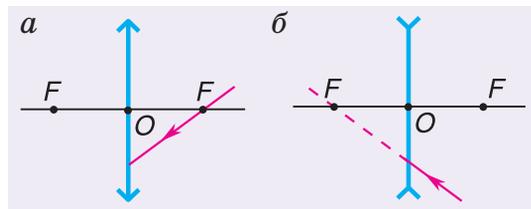


Рис. 269

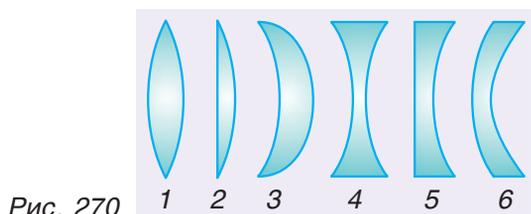


Рис. 270



## § 38.

## Построение изображений в тонких линзах

На уроках биологии в окуляр микроскопа вы рассматривали клетки растений. А задумывались ли вы, как получается их увеличенное изображение? Главными частями микроскопа являются линзы. Именно они позволяют получать увеличенное или уменьшенное (например, в фотоаппарате) изображение предмета.

Какие изображения предмета создает линза?

Проведем опыт. На столе расположим экран, собирающую линзу и зажженную свечу (рис. 271, а), удаленную от линзы на расстояние  $d$ , большее, чем удвоенное фокусное, т. е.  $d > 2F$ . Будем передвигать экран до тех пор, пока не увидим на нем четкое изображение пламени свечи. Чем оно отличается от изображения, которое мы видели в зеркале, поместив перед ним эту же свечу? Во-первых, оно уменьшенное, во-вторых, перевернутое. Но самое главное, что это изображение, в отличие от мнимого изображения в зеркале, реально существует. На экране концентрируется энергия света. Чувствительный термометр, помещенный в изображение пламени свечи, покажет повышение температуры. Поэтому полученное в линзе изображение называют действительным, в отличие от мнимых изображений, наблюдаемых в плоском зеркале.

Подтвердим сказанное построением (рис. 271, б). Для получения изображения точки  $A$  достаточно использовать два луча, ход которых после преломления в линзе известен. Луч  $1$  идет параллельно главной оптической оси и после преломления в линзе проходит через главный фокус. Луч  $2$  идет через оптический центр и не меняет своего направления после прохождения сквозь линзу. Точка  $A'$ , являющаяся пересечением прошедших линзу лучей  $1'$  и  $2'$ , есть действительное изображение точки  $A$ . Заметим, что через точку  $A'$  пройдет и любой другой луч, идущий от точки  $A$  после преломления. Благодаря этому энергия, излученная точкой  $A$  пламени свечи, будет сконцентрирована в точке  $A'$ .

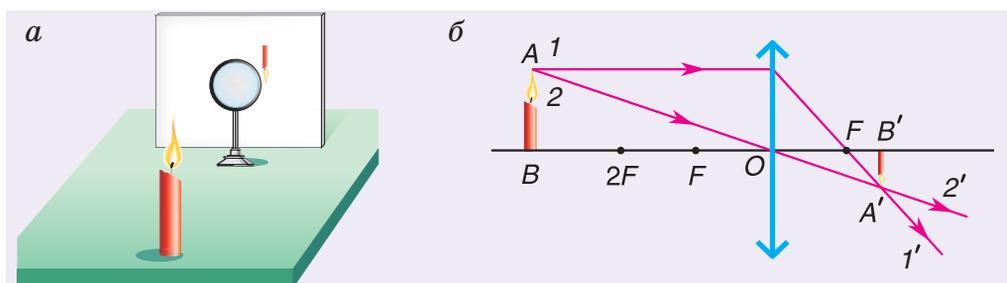


Рис. 271

Продолжим опыт. Поставим свечу на расстоянии  $d = 2F$ . Перемещая экран, мы увидим на нем действительное, перевернутое изображение пламени свечи, но размер его будет равен размеру пламени самой свечи (рис. 272). Сделайте сами построение изображения для этого случая.

Передвигая свечу ближе к линзе ( $F < d < 2F$ ) и удаляя экран, мы увидим на нем действительное, перевернутое, увеличенное изображение пламени свечи (построение сделайте сами).

Наконец поставим свечу на расстоянии  $d$  от линзы, меньше фокусного, т. е.  $d < F$ . С той же стороны, где находится сама свеча, можно увидеть увеличенное, прямое изображение свечи (рис. 273, а). Подтвердим этот результат построением (рис. 273, б). Изображения свечи на экране не будет. Оно мнимое, так как образовано пересечением не самих преломленных лучей, а их продолжений. Такое прямое, увеличенное, мнимое изображение наблюдает через линзу (она называется лупой) мастер, ремонтирующий ваши часы или мобильный телефон (рис. 274).

А какие изображения предмета дает рассеивающая линза? Пусть параллельно главной оптической оси падает луч 1 (рис. 275). После линзы преломленный луч 1' идет так, что только его продолжение проходит через фокус. Луч 2 не испытывает преломления. Видно, что лучи 1' и 2' не пересекаются. В точке А' пересекаются их продолжения. Тогда изображение точки А, а значит, и всего предмета АВ — мнимое. Как все мнимые изображения, оно прямое, но уменьшенное. Даст ли

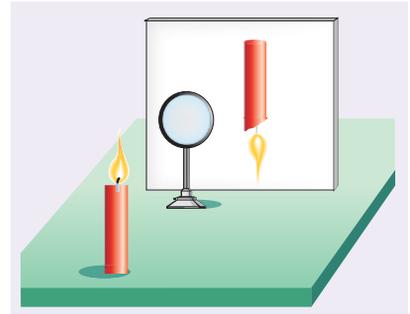


Рис. 272

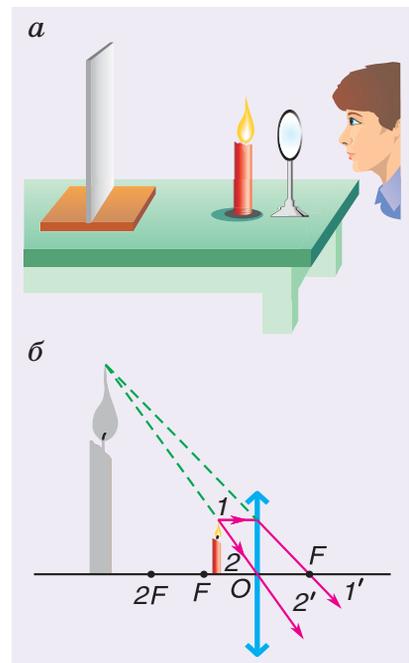


Рис. 273



Рис. 274

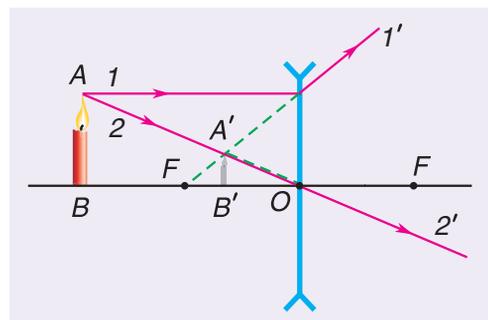


Рис. 275

рассеивающая линза действительное изображение, если менять положение предмета? Может ли оно быть увеличенным? Ответьте на эти вопросы сами, сделав соответствующие построения изображений предмета в тетради.

### ■ Главные выводы

1. Собирающая линза дает как действительные, так и мнимые изображения, рассеивающая — только мнимые.
2. Все мнимые изображения — прямые, все действительные — перевернутые.
3. Для нахождения изображения точки наиболее целесообразно использовать луч, идущий параллельно главной оптической оси линзы, и луч, идущий через ее оптический центр.

### ? Контрольные вопросы

1. Чем отличаются действительные изображения от мнимых?
2. Какие виды изображений дает собирающая линза?
3. На каком расстоянии от собирающей линзы нужно расположить предмет, чтобы получить изображение: а) уменьшенное; б) равное предмету; в) увеличенное (прямое и перевернутое)?
4. Какие изображения дает рассеивающая линза? Почему?
5. Какие лучи целесообразно использовать, чтобы найти изображение точки?
6.  Может ли двояковогнутая линза дать действительное изображение предмета?



### Пример решения задачи

С помощью стеклянной линзы на экране, удаленном от линзы на расстояние  $f = 36$  см, получено увеличенное в 3 раза изображение предмета. Определите расстояние от предмета до линзы и оптическую силу линзы.

Дано:

$$H = 3h$$

$$f = 36 \text{ см}$$

$$d = ?$$

$$D = ?$$

Решение

Построим изображение предмета в линзе (рис. 276). Поскольку изображение есть на экране, то оно действительное. Кроме того, оно увеличенное, значит, предмет находится между фокусом и двойным фокусом, а линза собирающая.

По условию размер предмета  $AB$  в 3 раза меньше размера изображения  $A'B'$ . Из подобия треугольников  $AOB$  и  $A'OB'$  следует, что таким же будет и соотношение их сторон  $BO$  и  $OB'$ . Значит, искомое расстояние  $d$  будет в 3 раза меньше заданного расстояния  $f$ . Это дает первый ответ:  $d = \frac{1}{3}f = 12$  см. Для ответа на второй вопрос используем подобие другой пары треугольников —  $CFO$  и  $A'FB'$ . И здесь подобные стороны треугольников различаются в 3 раза. Так как одна из них —  $OF$  равна фокусному расстоянию  $F$  линзы, а другая —  $FB'$  равна разности  $f - F$ , то их связь можно записать так:  $3F = f - F$ , или  $4F = f = 36$  см. Вычислив значение фокусного расстояния  $F = \frac{1}{4}f = 9$  см, найдем и искомое значение оптической силы  $D$  линзы:  $D = \frac{1}{F} = \frac{1}{0,09 \text{ м}} \approx 11$  дптр.

Ответ:  $d = 12$  см;  $D \approx 11$  дптр.

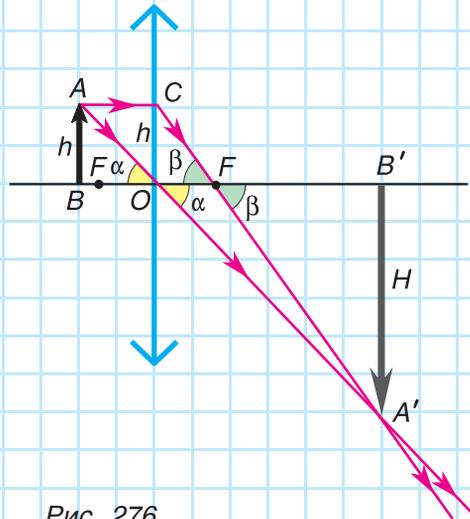


Рис. 276

### Упражнение 26

1. Изображение  $S'$  светящейся точки  $S$  относительно главной оптической оси  $CC'$  показано на рисунке 277, а, б. Какая была использована линза? Определите построением ее положение.

2. Свеча находится на расстоянии  $d = 20$  см от линзы, а ее изображение на экране — на расстоянии  $f = 60$  см от линзы. Во сколько раз размеры изображения отличаются от размеров самой свечи? Чему равна оптическая сила линзы?

3. Найдите построением положение фокальной плоскости представленной на рисунке 278 тонкой линзы.

 4. Чему равна оптическая сила комбинации трех стеклянных линз (рис. 279): двояковогнутой и двух плосковыпуклых?

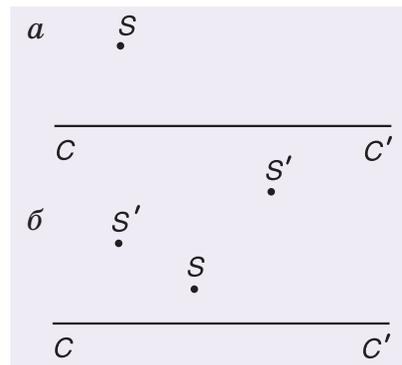


Рис. 277

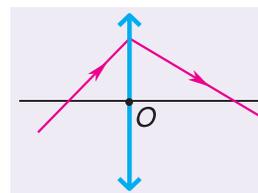


Рис. 278



Рис. 279