

# Оптика

Оптика — раздел физики, в котором изучается излучение света, его распространение и взаимодействие с веществом.

Различают *геометрическую, волновую и квантовую оптику.*

## Геометрическая оптика

В *геометрической оптике* не учитывается природа света, а его распространение в пространстве рассматривается, исходя из представлений о световых лучах. *Световой луч — это линия, вдоль которой распространяется световая энергия.*

Ниже приведены формулы геометрической оптики

### *Закон отражения*

$$277) \alpha = \beta$$

Здесь  $\alpha$  — угол падения (рад),  $\beta$  (или  $\gamma$ ) — угол отражения (рад).

## **Закон преломления**

$$278) \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21}$$

$$279) \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2}$$

Здесь  $\alpha$  — угол падения (рад),  $\gamma$  (или  $\beta$ ) — угол преломления (рад),  $n_{21}$  — показатель преломления второй среды относительно первой (безразмерный),  $v_1$  — скорость света в первой среде (м/с),  $v_2$  — скорость света во второй среде (м/с).

## **Физический смысл абсолютного показателя преломления**

$$280) n = \frac{c}{v}$$

Здесь  $n$  — абсолютный показатель преломления (безразмерный),  $c$  — скорость света в вакууме (м/с),  $v$  — скорость света в прозрачной среде (м/с).

## **Физический смысл относительного показателя преломления**

$$281) n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$$

Здесь  $n_{21}$  — показатель преломления второй среды относительно первой,  $v_1$  — скорость света в первой среде (м/с),  $v_2$  — скорость света во второй среде.

## **Связь относительного показателя преломления двух сред с их абсолютными показателями преломления**

$$282) n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$$

Здесь  $n_{21}$  — относительный показатель преломления сред (безразмерный),  $n_1$  — абсолютный показатель преломления первой среды,  $n_2$  — абсолютный показатель преломления второй среды.

## **Формула предельного угла полного отражения**

$$283) \sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}$$

$$284) \text{ при } n_2 = 1 \quad \sin \alpha_0 = \frac{1}{n_1}$$

Здесь  $\alpha_0$  — предельный угол полного отражения (рад),  $n_1$  — абсолютный показатель преломления первой среды (безразмерный),  $n_2$  — абсолютный показатель преломления второй среды (безразмерный).

### **Формула линзы**

$$285) \frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}, \quad \frac{1}{d} + \frac{1}{f} = D$$

Здесь  $d$  — расстояние от предмета до линзы (м),  $f$  — расстояние от линзы до изображения (м),  $F$  — фокусное расстояние линзы (м),  $D$  — оптическая сила линзы (дптр).

### **Формула оптической силы линзы**

$$286) D = \frac{1}{F}$$

Все величины названы в предыдущей формуле.

### **Линейное увеличение линзы**

$$287) \Gamma = \frac{H}{h}$$

$$288) \Gamma = \frac{f}{d}$$

Здесь  $\Gamma$  — линейное увеличение линзы (безразмерное),  $H$  — линейный размер изображения (м),  $h$  — линейный размер предмета (м),  $d$  — расстояние от предмета до линзы (м),  $f$  — расстояние от линзы до изображения (м).

### **Линейное увеличение лупы**

$$289) \Gamma = \frac{d_0}{F}$$

Здесь  $d_0 = 25$  см — расстояние наилучшего зрения,  $F$  — фокусное расстояние лупы.

**Геометрическая оптика** базируется на четырех законах:

- законе прямолинейности световых лучей;
- законе независимости световых лучей;

- законе отражения;
- законе преломления.

### Закон прямолинейности световых лучей

Свет в однородной и изотропной среде распространяется прямолинейно. Доказательством этому служит образование тени и полутени. Если источник света  $S$  точечный, то позади непрозрачного предмета  $M$  образуется тень (рис. 196, а), а если источник света  $S$  протяженный, то позади такого предмета  $M$  образуются тень и полутени (рис. 196, б).

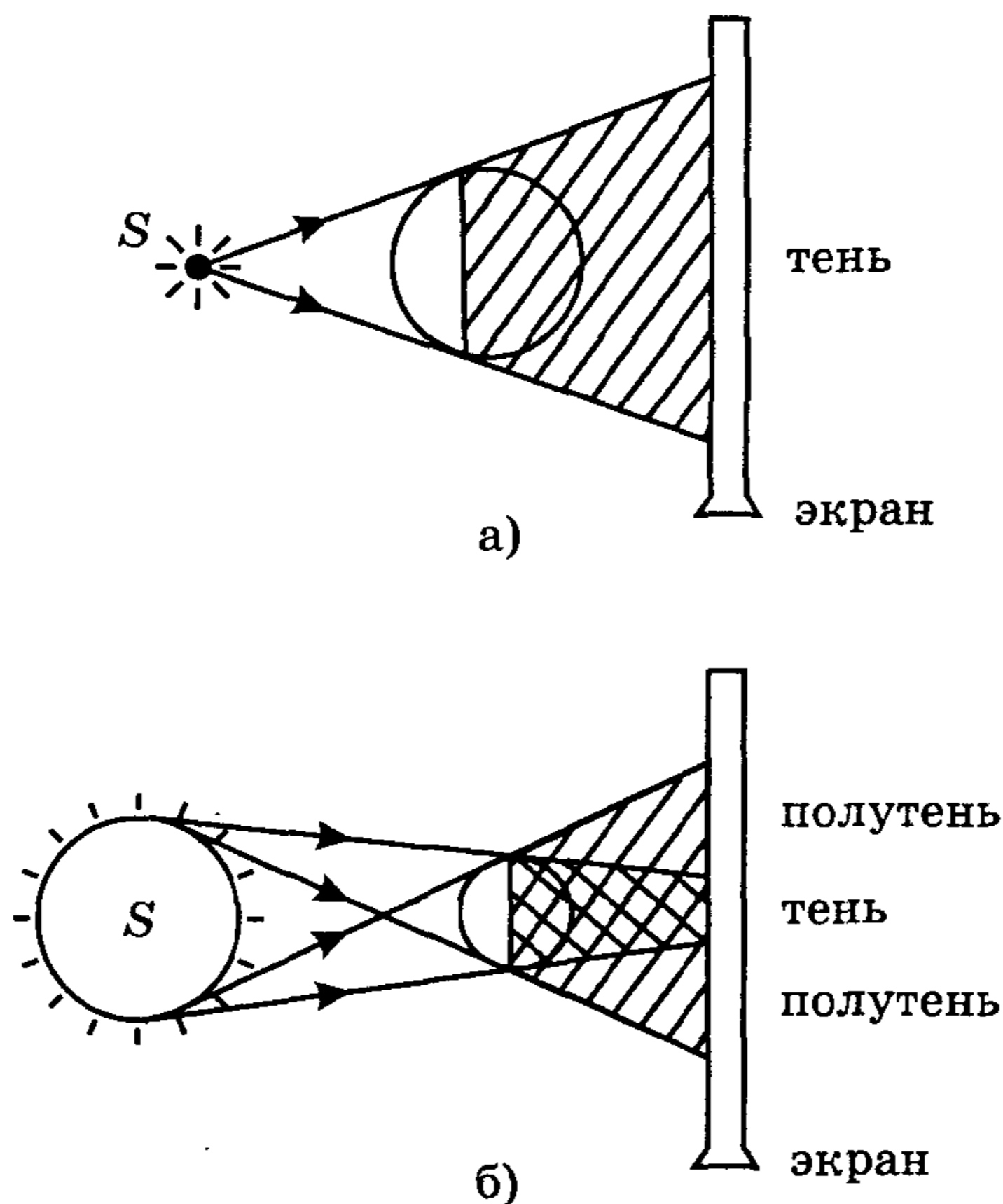


Рис. 196

*Точечный источник света* — это абстрактный источник, представляющий собой светящуюся материальную точку. Если точечный источник света удален в бесконечность, то его лучи падают на освещаемый предмет параллельным пучком.

Световой луч не может быть бесконечно тонким. При прохождении сквозь отверстие, в котором уместятся несколько длин волн, он расширяется вследствие дифракции и загибается в область геометрической тени.

## Закон независимости световых лучей

При пересечении световых лучей каждый луч распространяется в прежнем направлении. Этот закон нарушается при пересечении световых лучей с очень большой энергией, например, лазерных лучей.

При падении световых лучей на непрозрачную гладкую преграду они меняют направление, возвращаясь в прежнюю среду. Это явление называется *отражением света*. Угол между падающим лучом и перпендикуляром к отражающей свет поверхности называется *углом падения*  $\alpha$ . Угол между отраженным лучом и перпендикуляром к отражающей поверхности называется *углом отражения*  $\beta$  (или  $\gamma$ ) (рис. 197).

### Законы отражения:

– луч падающий и луч отраженный всегда лежат в одной плоскости с перпендикуляром, проведенным в точку падения к отражающей поверхности по разные стороны от него;

– угол отражения всегда равен углу падения,  $\alpha = \beta$ .

Если луч падает перпендикулярно отражающей поверхности, то угол падения равен нулю, поэтому и угол отражения тоже равен нулю. В этом случае луч отражается в обратном направлении — сам по себе.

На законе отражения основано получение изображения  $A_1B_1$  предмета  $AB$  в плоском зеркале (рис. 198).

*Плоское зеркало  $mn$  дает мнимое и прямое изображение  $A_1B_1$ , равное по размеру предмету  $AB$  и расположенное от зеркала на таком же расстоянии, что и предмет:  $d = d_1$* . Исключение составляет случай, когда на плоское зеркало падает пучок сходящихся лучей (рис. 199), — в этом случае изображение  $S$  получится действительным.

Если поверхности двух плоских зеркал образуют угол  $\varphi$  (рис. 200), то количество изображений  $N$  в такой системе зеркал можно определить по формуле

$$N = \frac{360^\circ}{\varphi} - 1.$$

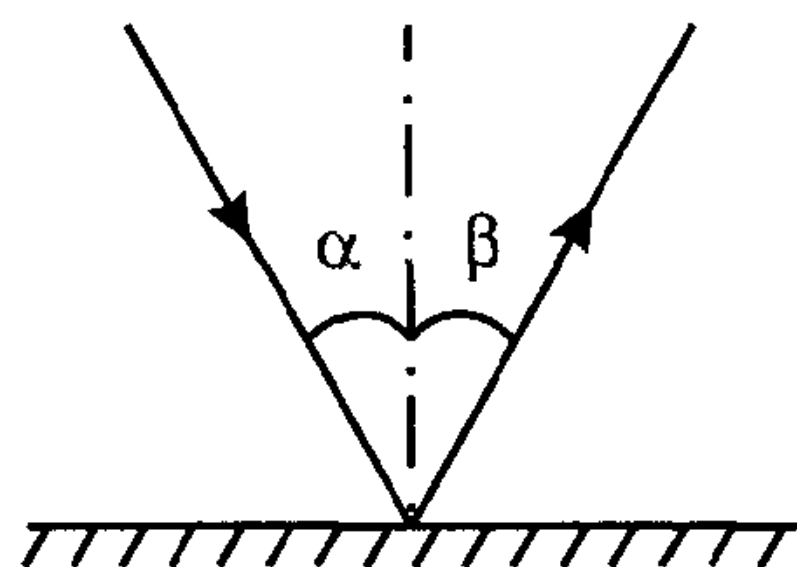


Рис. 197

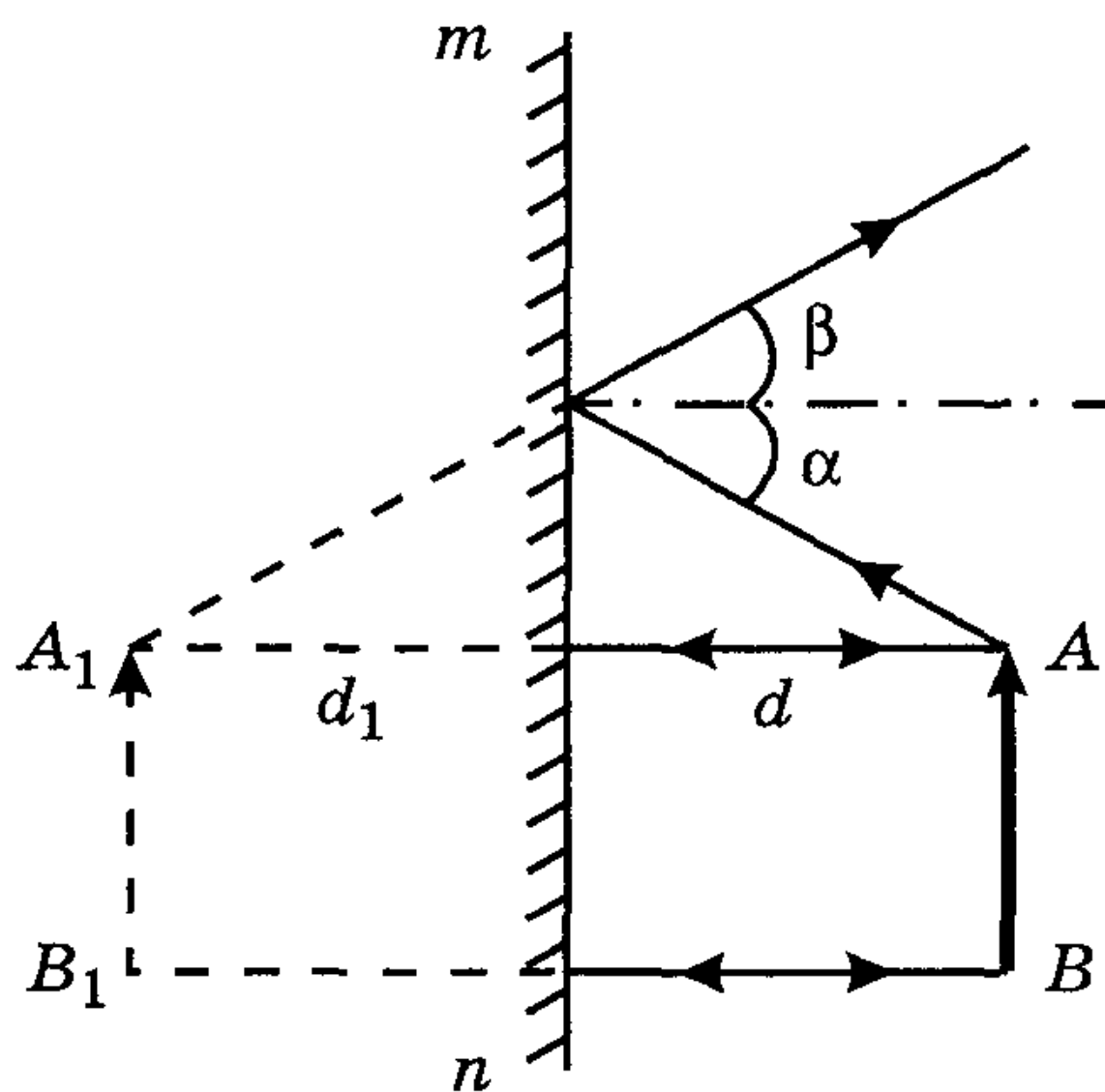


Рис. 198

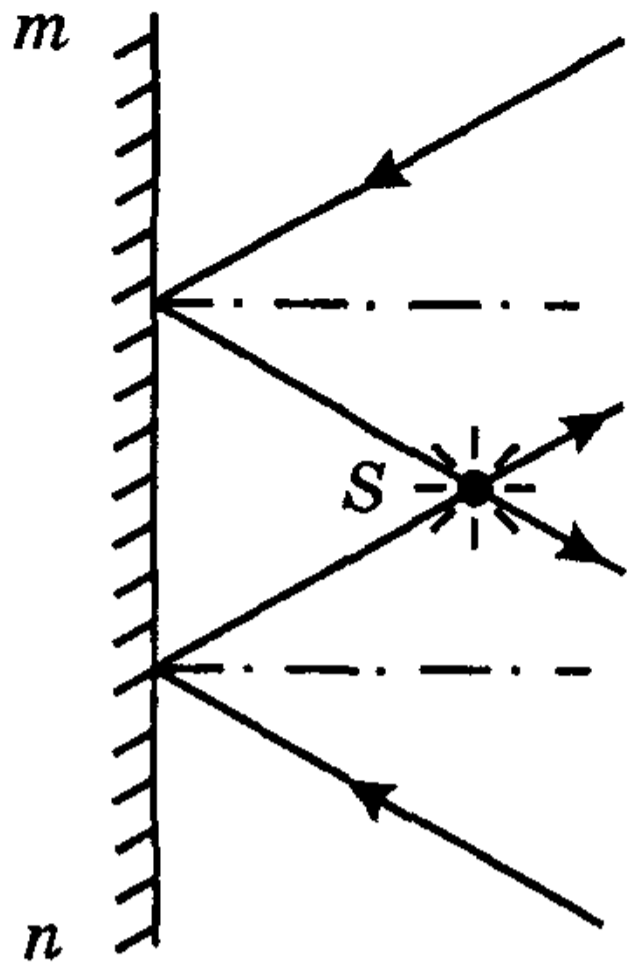


Рис. 199

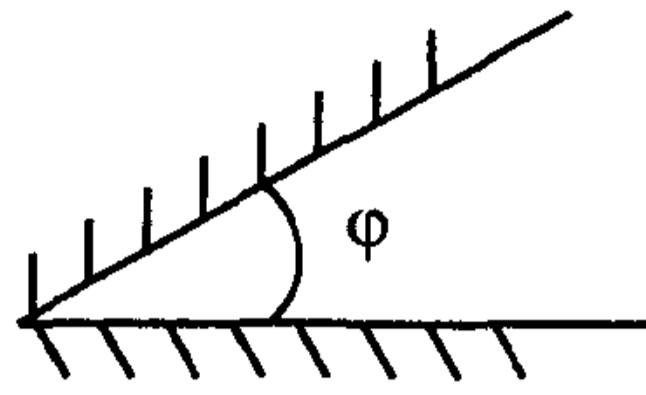


Рис. 200

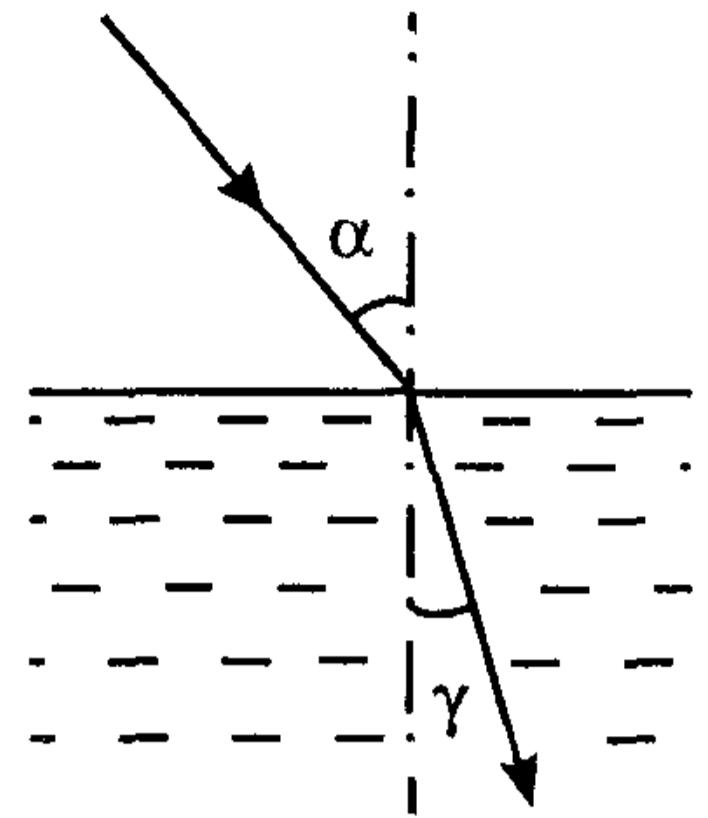


Рис. 201

При переходе света из одной прозрачной среды в другую меняется направление светового луча. Это явление называется *преломлением света*. Угол  $\gamma$  между преломленным лучом и перпендикуляром к преломляющей поверхности называется *углом преломления* (рис. 201).

### **Законы преломления:**

– луч падающий и луч преломленный всегда лежат в одной плоскости с перпендикуляром, опущенным в точку падения луча к преломляющей поверхности, по разные стороны от перпендикуляра;

– *отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред и называется показателем преломления второй среды относительно первой  $n_{21}$*  (формула 278):

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21} .$$

При этом *первой средой* является та среда, в которой распространяется падающий луч, а *второй средой* — та, в которой распространяется преломленный луч. Например, если свет переходит из воды в стекло, то  $n_{21}$  — это показатель преломления стекла относительно воды, а если — наоборот, из стекла в воду, то  $n_{21}$  — показатель преломления воды относительно стекла.

Если луч переходит из вакуума (воздуха) в прозрачную среду, то показатель преломления этой среды относительно вакуума называется *абсолютным показателем преломления этой среды  $n$* . Значение абсолютного показателя преломления каждой среды приводится в справочных данных.

Физический смысл абсолютного показателя преломления среды: *абсолютный показатель преломления среды показывает, во сколько*

раз скорость света в вакууме больше, чем в данной среде (формула 280):

$$n = \frac{c}{v}$$

Относительный показатель преломления  $n_{21}$  равен отношению абсолютного показателя преломления второй среды к относительному показателю преломления первой среды (формула 282):

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$$

Физический смысл относительного показателя преломления: относительный показатель преломления показывает, во сколько раз отличается скорость света в первой среде от скорости света во второй среде (формула 281):

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$$

Та среда, у которой абсолютный показатель преломления больше, называется *оптически более плотной*. Если свет переходит из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, например, из воздуха в воду, то угол падения  $\alpha$  больше угла преломления  $\gamma$  (рис. 201). И наоборот, если луч переходит из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, например, из воды в воздух, то угол падения  $\alpha$  меньше угла преломления  $\gamma$  (рис. 202).

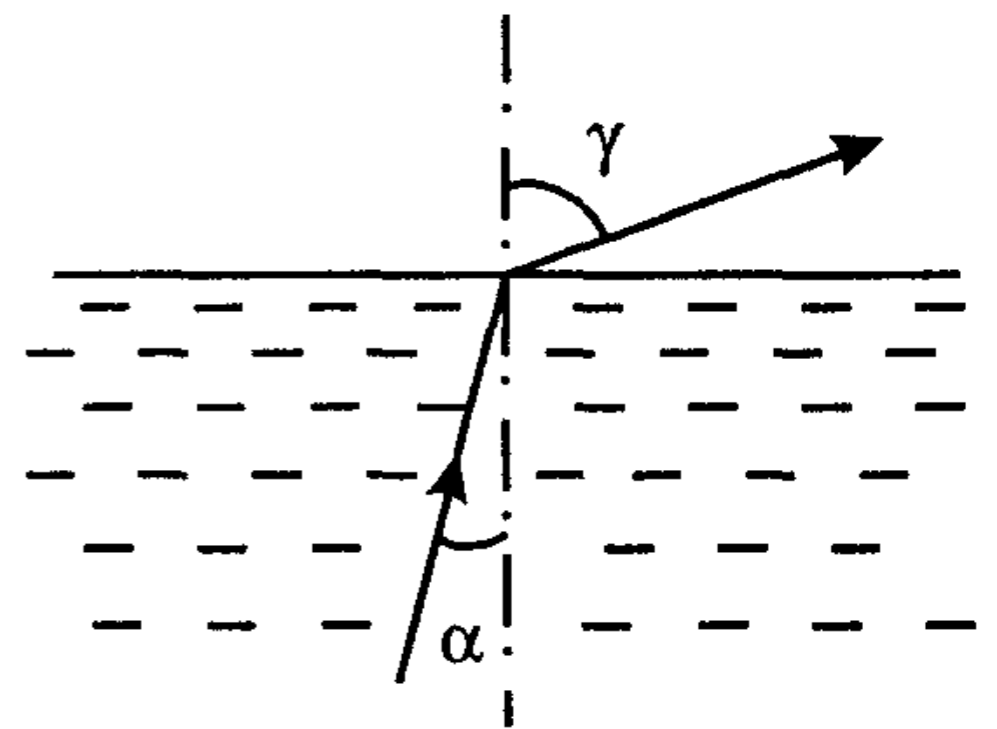


Рис. 202

В случае перехода луча из оптически более плотной среды в оптически менее плотную существует такой угол падения, при котором преломленный луч скользит по границе раздела сред с разной оптической плотностью. При этом угол преломления равен  $90^\circ$  (рис. 203). Такой угол падения называется *предельным углом полного отражения*  $\alpha_{\text{пред}}$  (формулы 283) и 284):

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1} \text{ и } \sin \alpha_0 = \frac{1}{n_1}$$

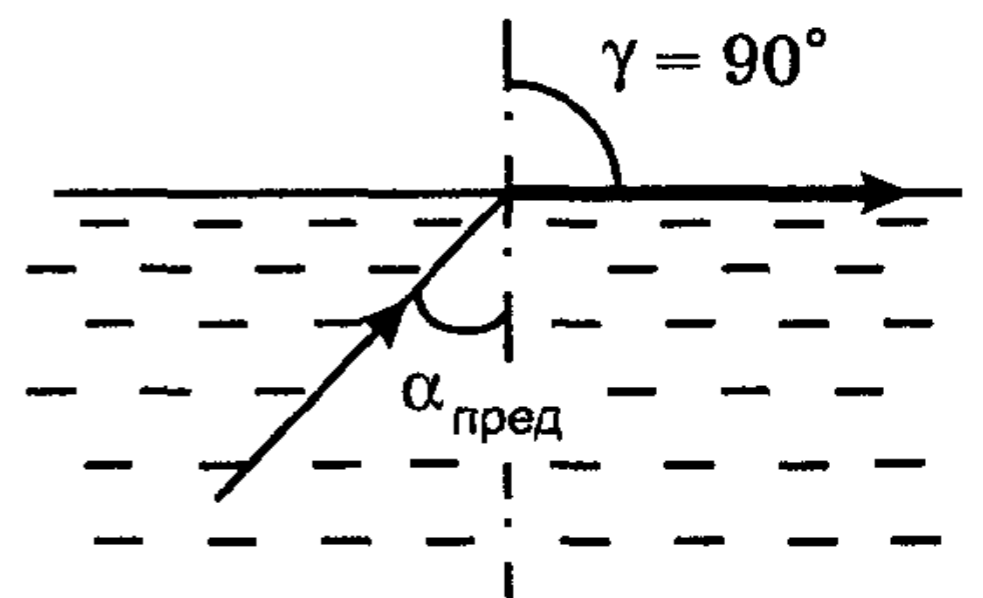


Рис. 203

Если луч упадет на поверхность под углом больше предельного, то он полностью

отразится обратно в первую среду (рис. 204). Такое явление называется *полным отражением*.

Если точечный источник света  $S$  находится под водой, то из воды выйдут только лучи, упавшие на ее поверхность под углом меньше предельного (рис. 205). Лучи, упавшие под углом, равным предельному, будут скользить по поверхности воды, а лучи, упавшие под углом больше предельного, не выйдут из воды. В результате наблюдатель сверху увидит на поверхности воды резко очерченный светлый круг, представляющий собой основание светового конуса с вершиной в источнике света  $S$ .

Проходя сквозь плоскопараллельную пластинку из вещества, оптически более плотного, чем окружающая среда, луч не меняет своего направления, а лишь смещается на расстояние  $x$  (рис. 206). Смещение луча  $x$  тем больше, чем толще пластинка и чем больше показатель преломления ее вещества.

Проходя сквозь треугольную призму, изготовленную из оптически более плотного, чем окружающая среда, вещества, луч дважды преломляется, отклоняясь к ее основанию (рис. 207). При этом изображение  $S_1$  источника света  $S$  смещается к вершине призмы. Угол  $\varphi$ , лежащий против основания призмы, называется *преломляющим углом* призмы.

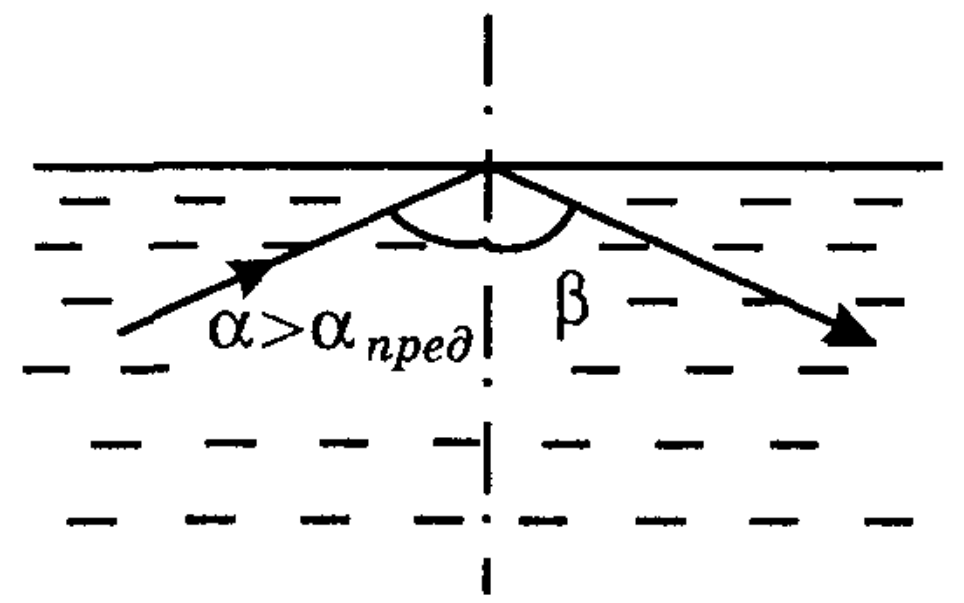


Рис. 204

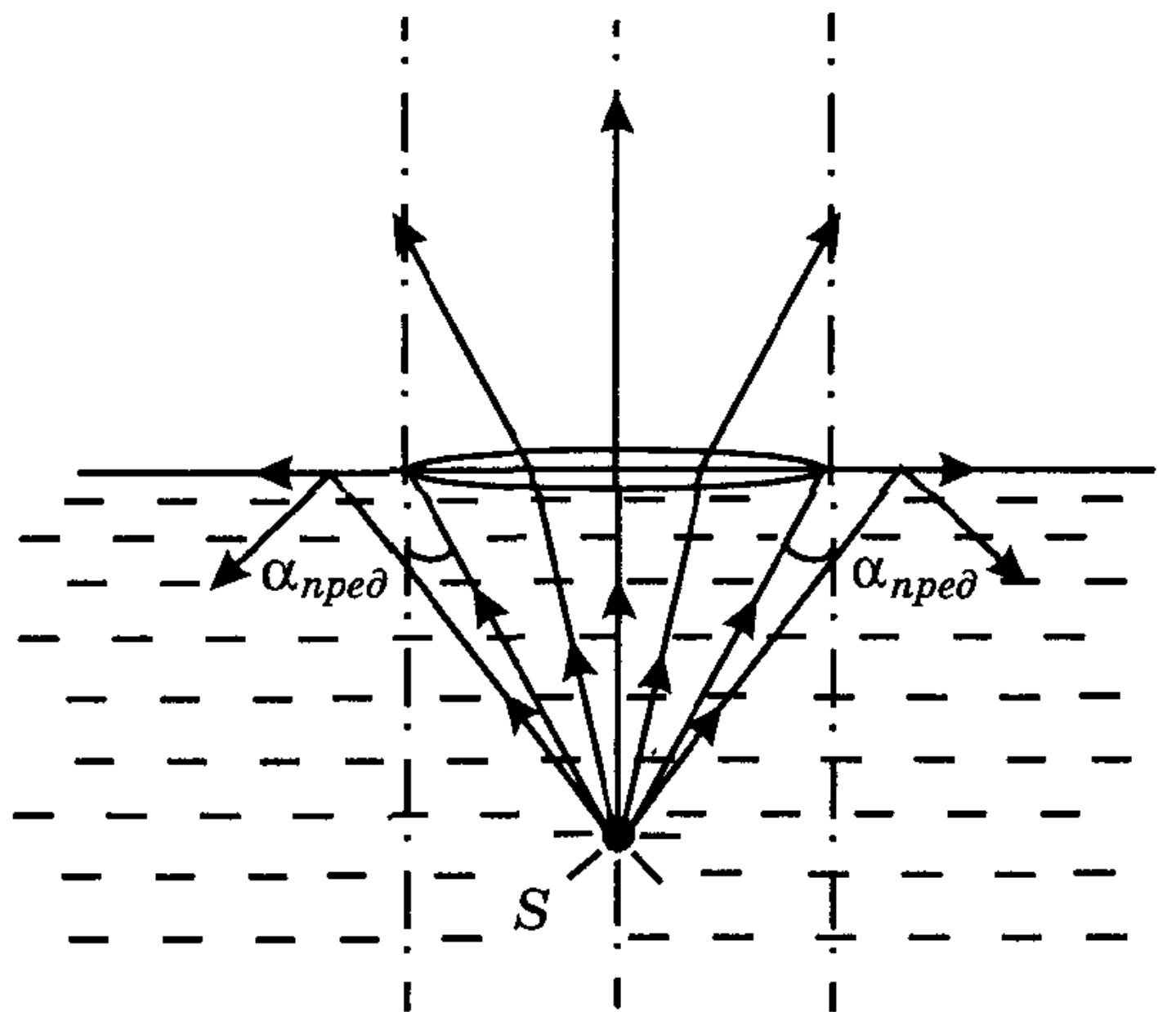


Рис. 205

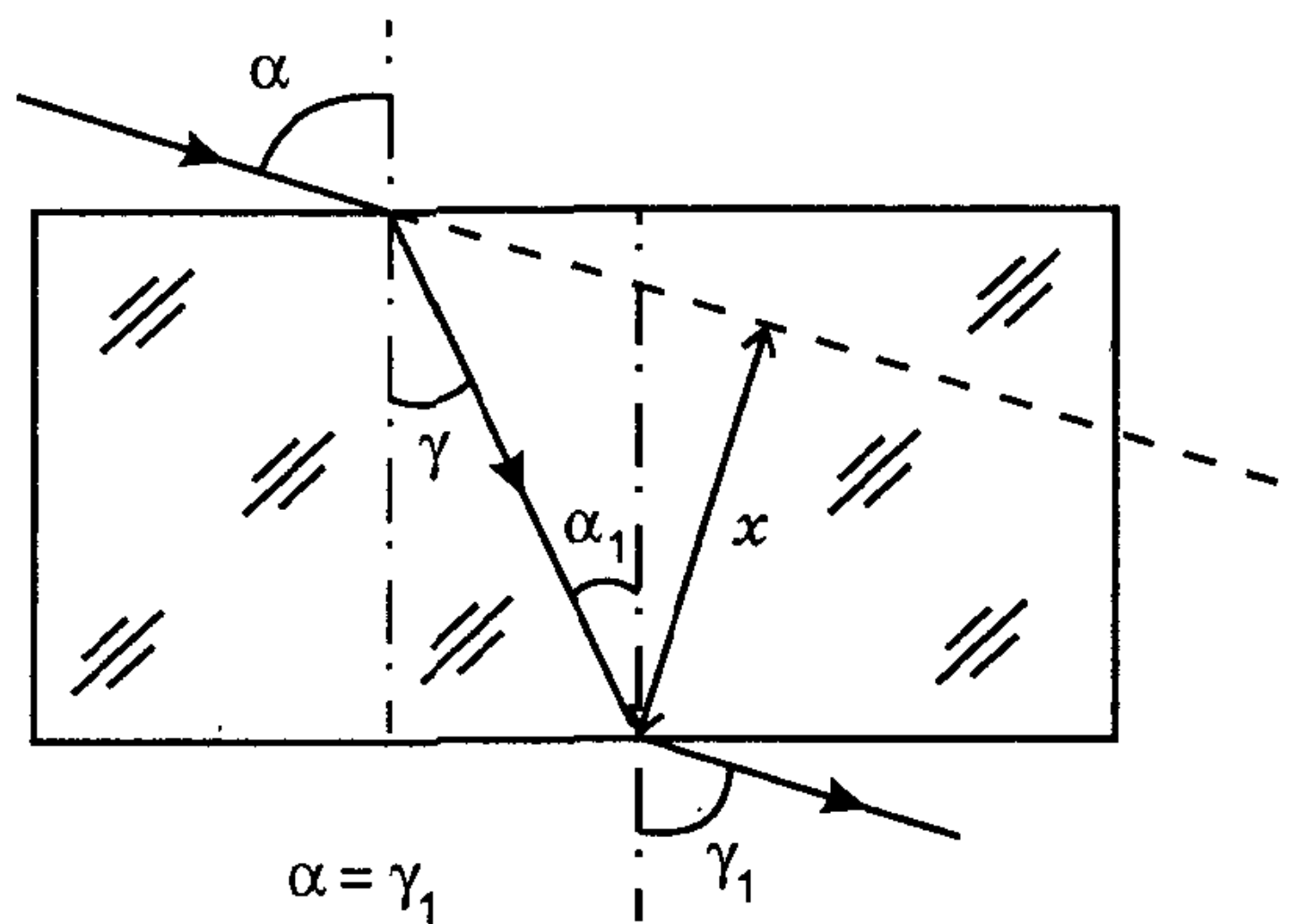


Рис. 206



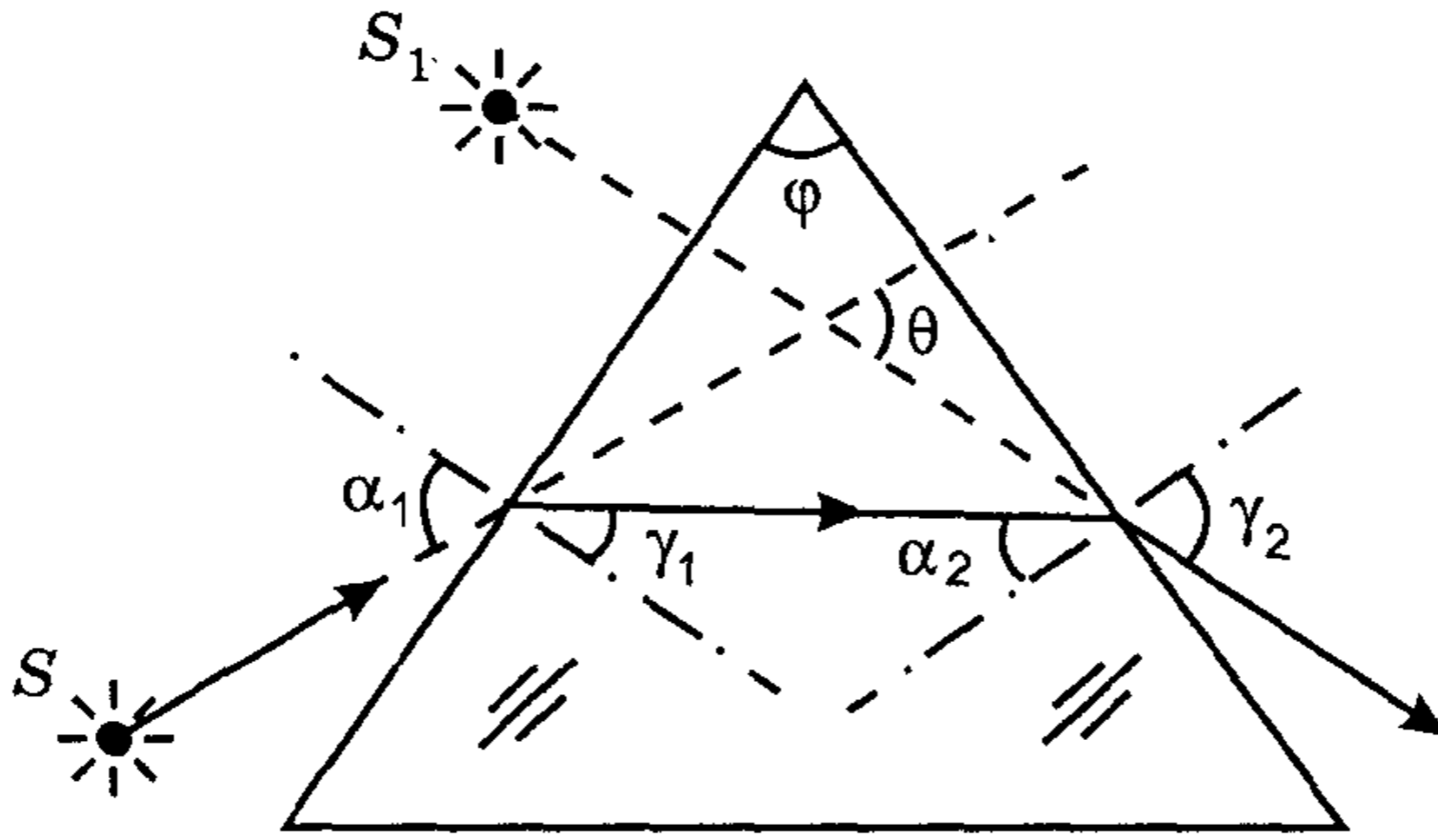


Рис. 207

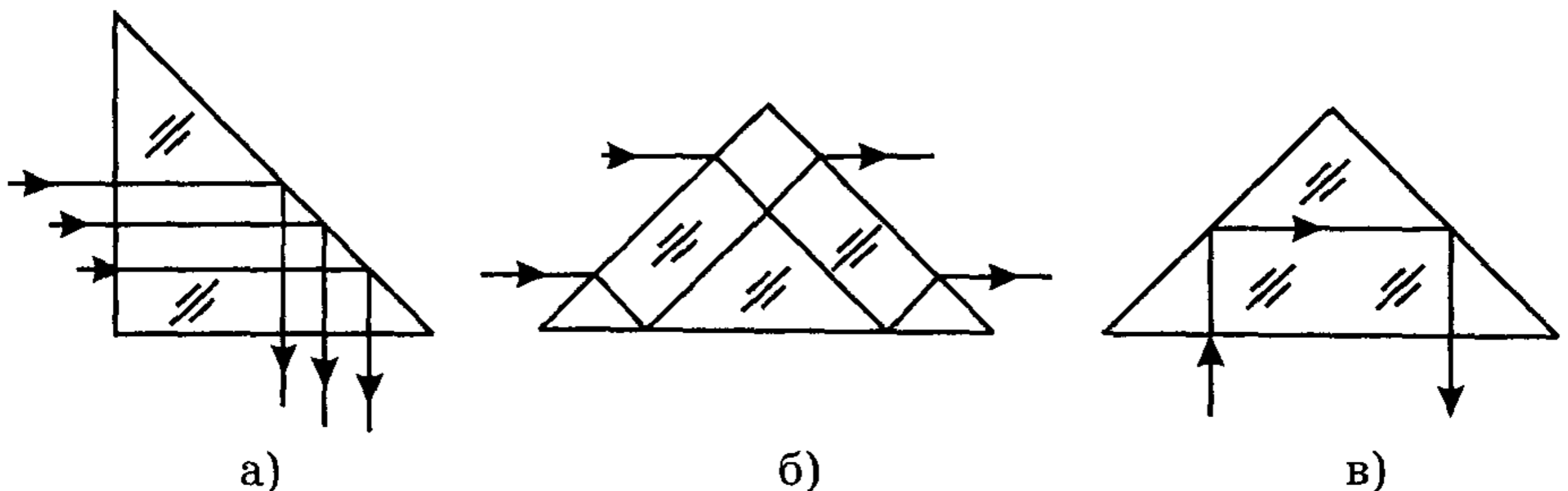
Угол  $\theta$  между направлениями упавшего на призму и вышедшего из призмы лучей называется *углом отклонения луча*. Угол отклонения  $\theta$  зависит от угла падения луча на призму  $\alpha_1$ , преломляющего угла призмы  $\varphi$  и показателя преломления  $n$  вещества, из которого она изготовлена.

С помощью треугольной равнобедренной призмы с преломляющим углом  $90^\circ$  можно менять направление луча на  $90^\circ$  (рис. 208, а), изменять относительное расположение лучей (рис. 204, б) и поворачивать луч обратно (рис. 208, в).

*Линзой называют прозрачное для света тело, ограниченное сферическими или иными криволинейными поверхностями, одна из которых может быть плоской*. Если линза в средней части толще, чем у краев, то она называется *выпуклой*, а если наоборот, — то *вогнутой*.

Двояковыпуклая линза называется *собирающей*, т. к. она собирает после преломления параллельные лучи в одной точке (рис. 209, а).

Вершины сферических сегментов  $P_1$  и  $P_2$ , образующих линзу, называются ее *полюсами*. Точка, в которой сливаются полюсы бесконечно тонкой линзы, называется ее *главным оптическим центром*  $O$ .



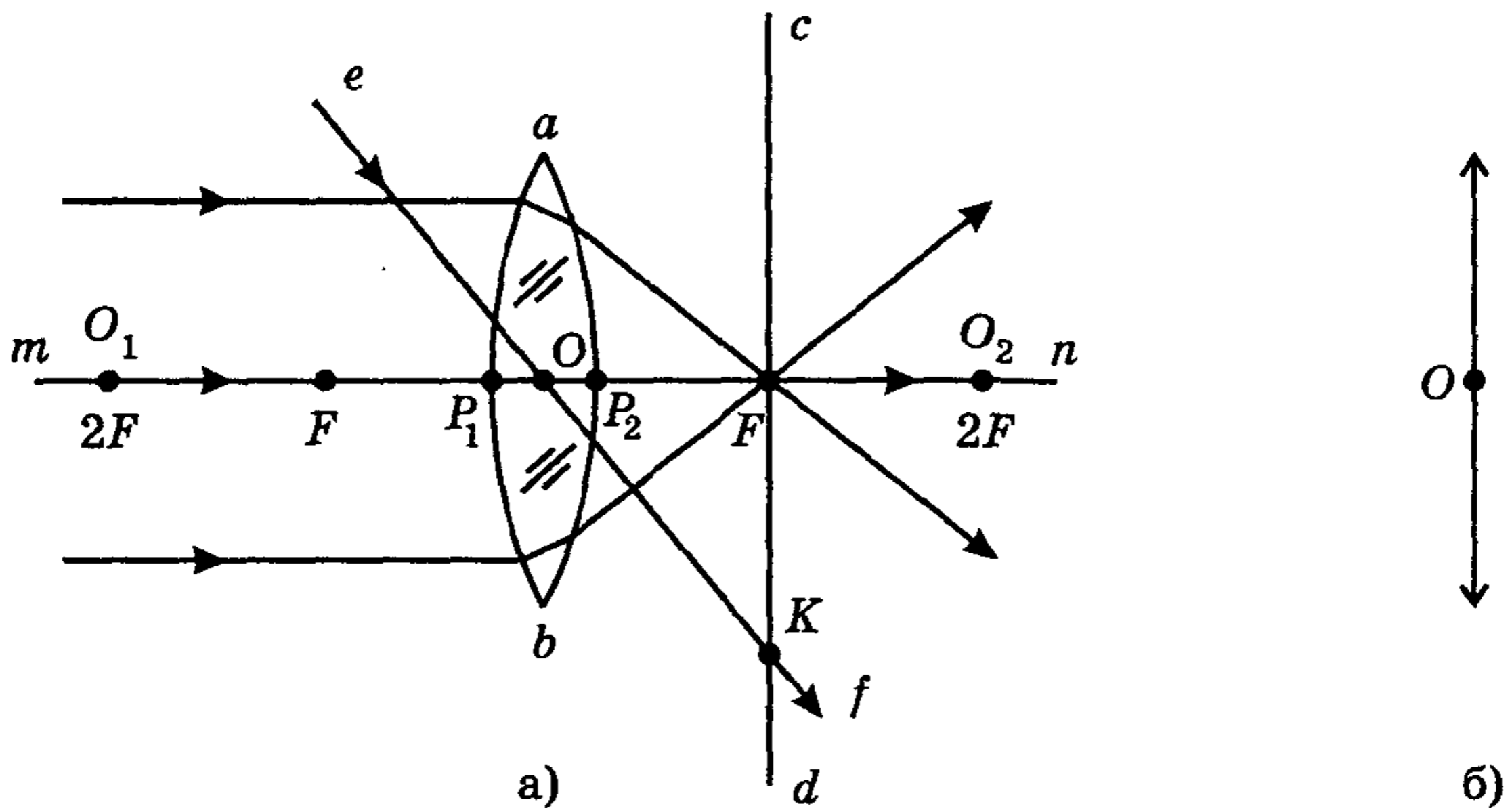


Рис. 209

Прямая  $mn$ , проходящая через центры сфер  $O_1$  и  $O_2$ , поверхности которых образуют линзу, называется *главной оптической осью линзы*. Точка, в которой пересекаются лучи, падающие на линзу параллельно ее главной оптической оси, называется *фокусом линзы  $F$* . Фокус линзы  $F$  делит расстояние между центром сферы  $O_1$  и главным оптическим центром линзы пополам, поэтому центр  $O_1$  называют *двойным фокусом линзы  $2F$* .

Расстояние  $OF$  от фокуса линзы до ее главного оптического центра называется *фокусным расстоянием линзы* и тоже обозначается буквой  $F$ . Собирающая линза имеет два *действительных фокуса  $F$*  и два *двойных фокуса  $2F$* , расположенных по обе стороны линзы. На рис. 209, б) показано условное изображение собирающей линзы.

Любой луч  $ef$ , проходящий через главный оптический центр линзы  $O$ , не преломляется. Такой луч называется *побочной осью линзы*.

Плоскость  $ab$ , проходящая через главный оптический центр линзы  $O$  перпендикулярно ее главной оптической оси, называется *главной плоскостью линзы*. Плоскость  $cd$ , проходящая через фокус линзы перпендикулярно ее главной оптической оси, называется *фокальной плоскостью линзы*.

Главное свойство *фокальной плоскости собирающей линзы*: она является геометрическим местом точек, в которых пересекаются параллельные лучи, падающие на собирающую линзу под разными углами (рис. 210).

Чтобы узнать, как пойдет после преломления луч, упавший на собирающую линзу под углом к главной оптической оси, надо провести

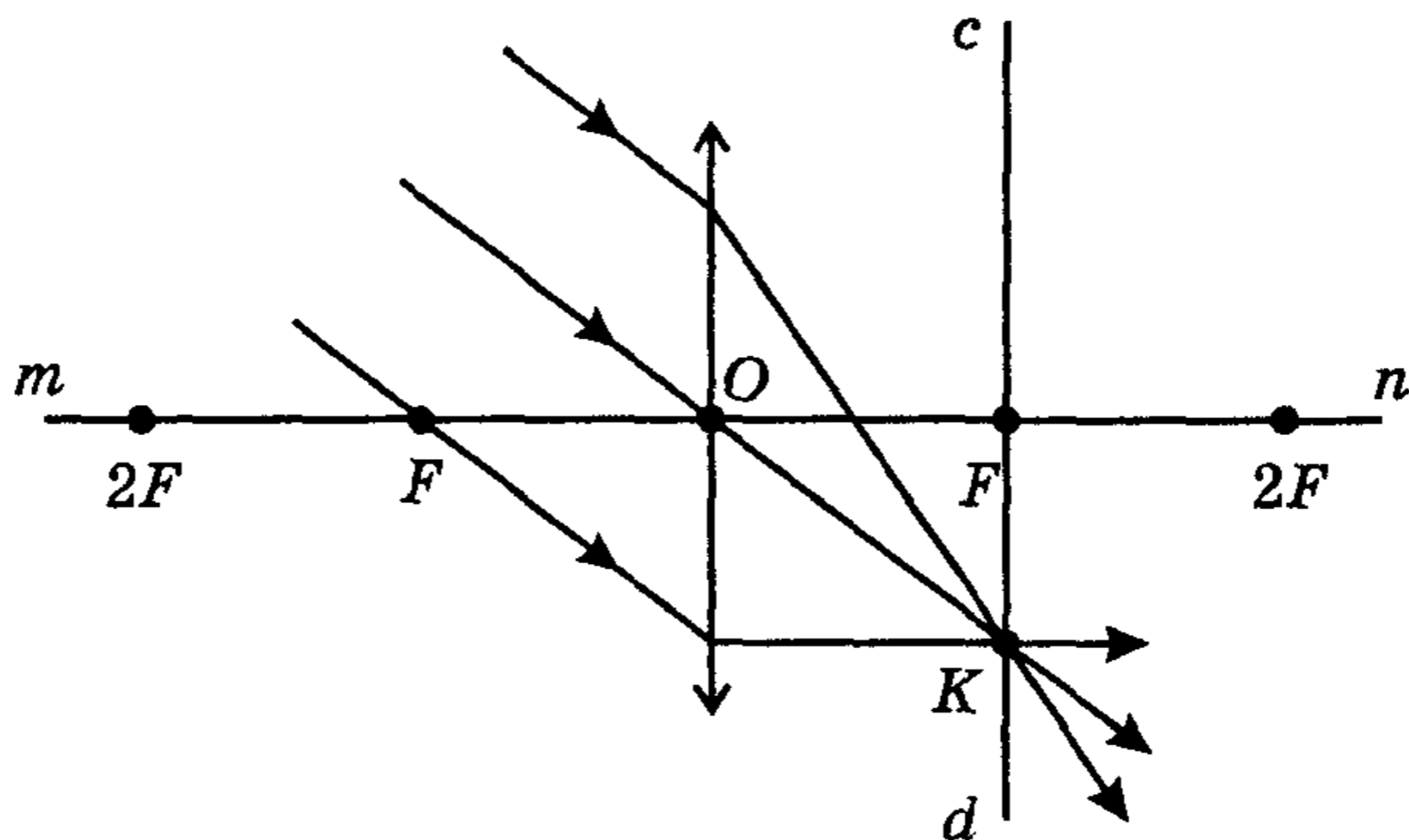


Рис. 210

через главный оптический центр линзы побочную ось, параллельную произвольному лучу и построить с другой стороны линзы главную фокальную плоскость  $cd$ . Побочная ось не преломится в линзе и пересечет главную фокальную плоскость  $cd$  в некоторой точке  $K$ . А поскольку побочная ось параллельна произвольному лучу, то он после преломления тоже пойдет через точку  $K$  (рис. 211).

Если на линзу падает пучок параллельных лучей, значит, их источник расположен в бесконечности, т. е. расстояние от источника до линзы  $d = \infty$ . Если такие лучи параллельны главной оптической оси, то после преломления они пересекутся в фокусе линзы  $F$ , — там появится действительное изображение  $S_1$  источника  $S$ , удаленного в бесконечность

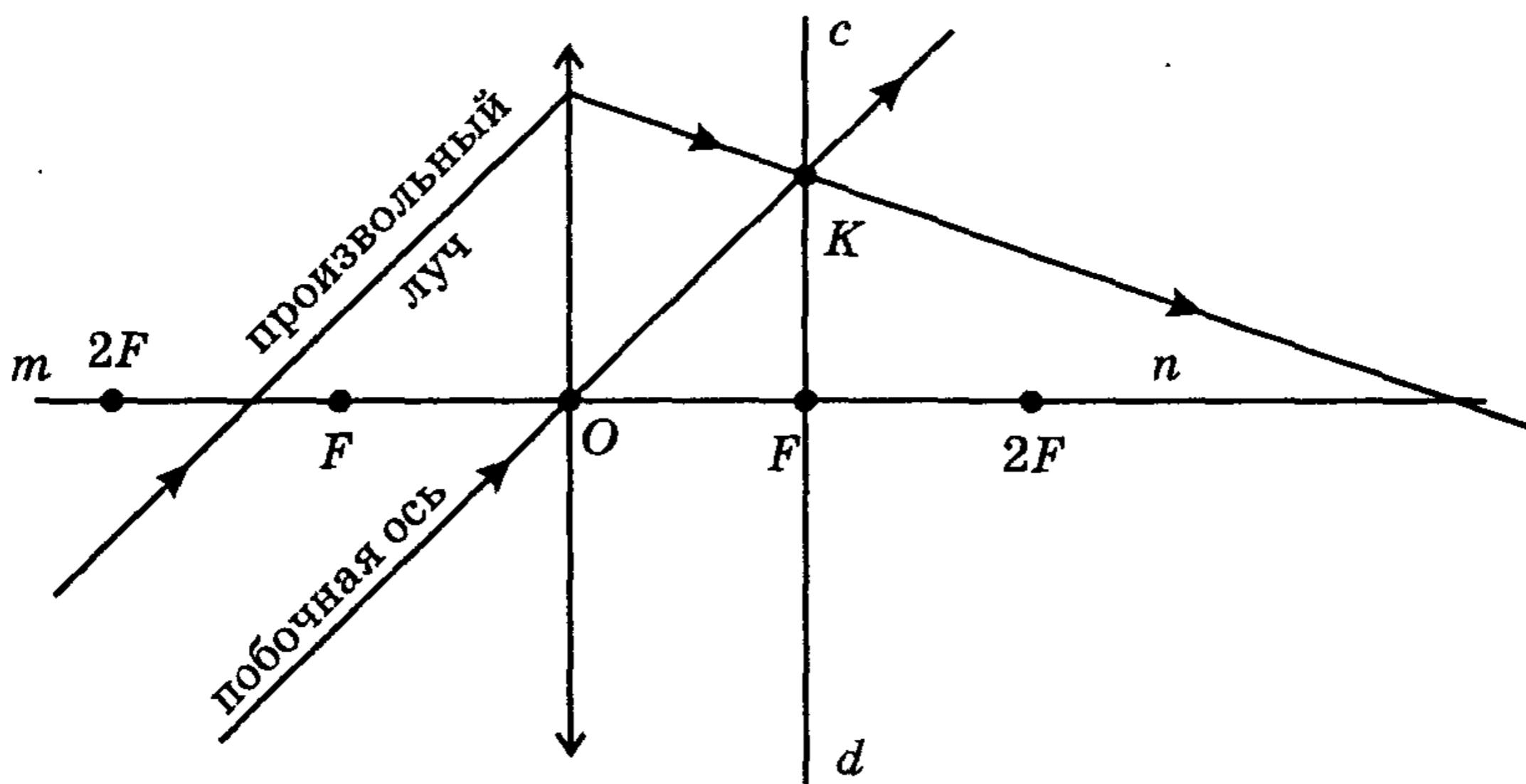


Рис. 211

(рис. 209, а). Световые лучи обратимы. Это значит, что если в фокус собирающей линзы поместить точечный источник света  $S$ , то после преломления в линзе его лучи пойдут параллельно главной оптической оси линзы и изображение  $S_1$  источника уйдет в бесконечность, т. е. расстояние от линзы до изображения  $f = \infty$  (рис. 212).

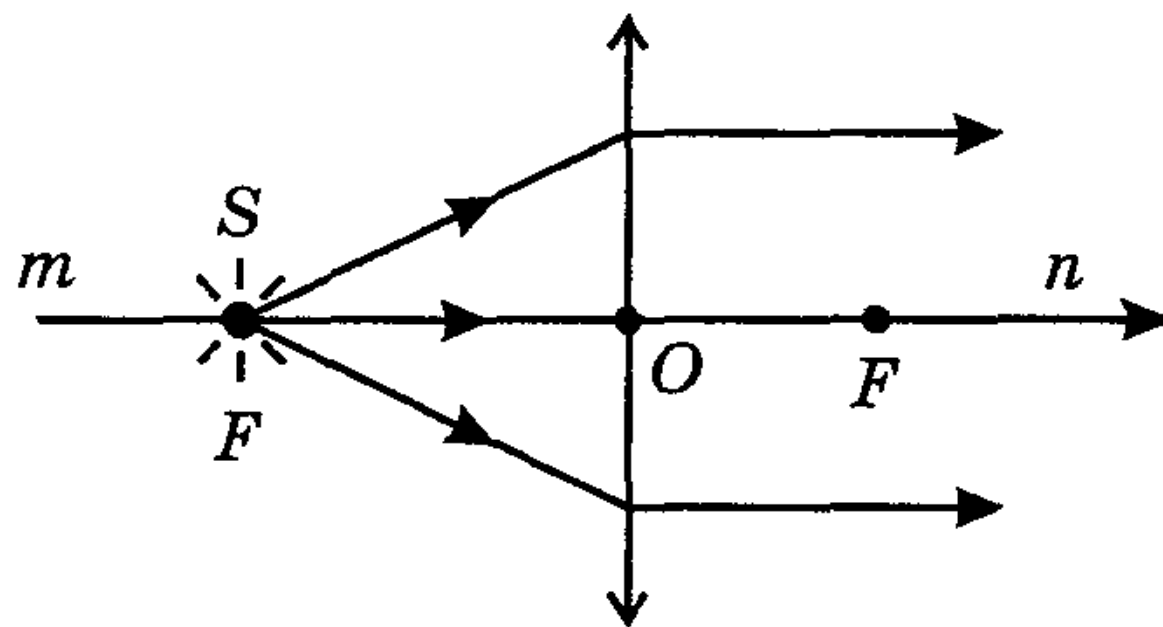


Рис. 212

Как правило, если в условии задачи не сказано, о какой линзе идет речь, значит, это собирающая линза. Если у вас имеется хотя бы часть линзы, изображение в ней строится так же, как если бы это была целая линза.

Двояковогнутая линза рассеивает пучки параллельных лучей, падающих на нее, поэтому она называется *рассеивающей линзой*. Если пучок лучей падает на рассеивающую линзу параллельно ее главной оптической оси, то после преломления в линзе их мнимые продолжения пересекаются в одной точке, которая является *мнимым фокусом F* рассеивающей линзы (рис. 213, а). Рассеивающая линза имеет два *мнимых фокуса F*, расположенных на главной оптической оси по обе стороны от нее на середине отрезка  $O_1O$ . На рис. 213, б) показано условное изображение рассеивающей линзы.

Плоскость  $cd$ , перпендикулярная главной оптической оси и проходящая через фокус рассеивающей линзы, называется *главной фокальной плоскостью* этой линзы.

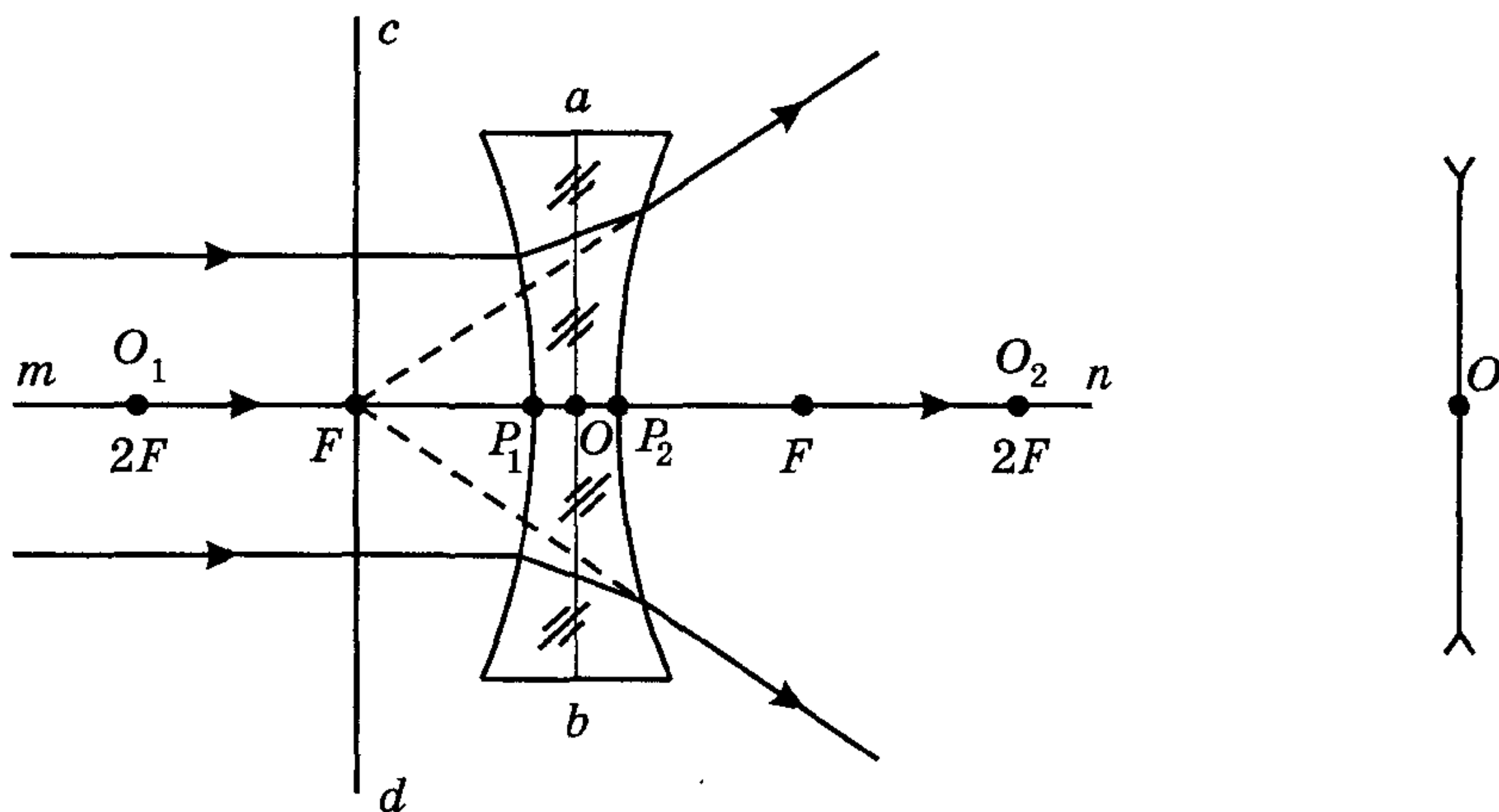


Рис. 213

Главное свойство фокальной плоскости рассеивающей линзы: она является геометрическим местом точек, в которых пересекаются мнимые продолжения любых параллельных лучей, падающих на линзу под разными углами (рис. 214).

Чтобы узнать, как пойдет упавший на рассеивающую линзу произвольный луч после преломления, надо провести параллельную ему побочную ось и построить главную фокальную плоскость  $cd$  с той же стороны линзы, где лежит и произвольный луч. Точку  $K$ , в которой побочная ось пересечет главную фокальную плоскость, надо соединить с точкой падения произвольного луча на линзу его мнимым (штриховым) продолжением, а сам луч пойдет в противоположном направлении (рис. 215).

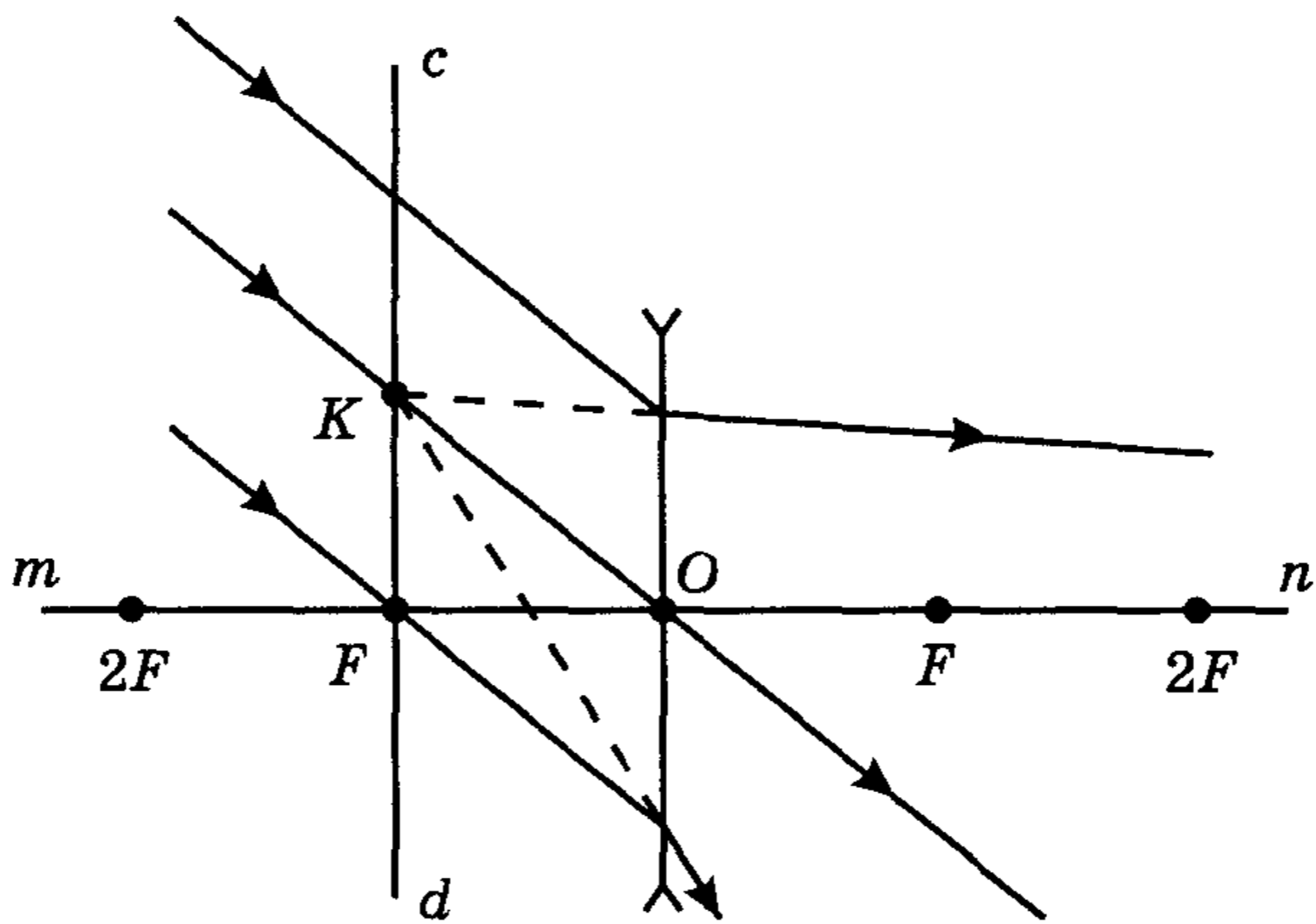


Рис 214

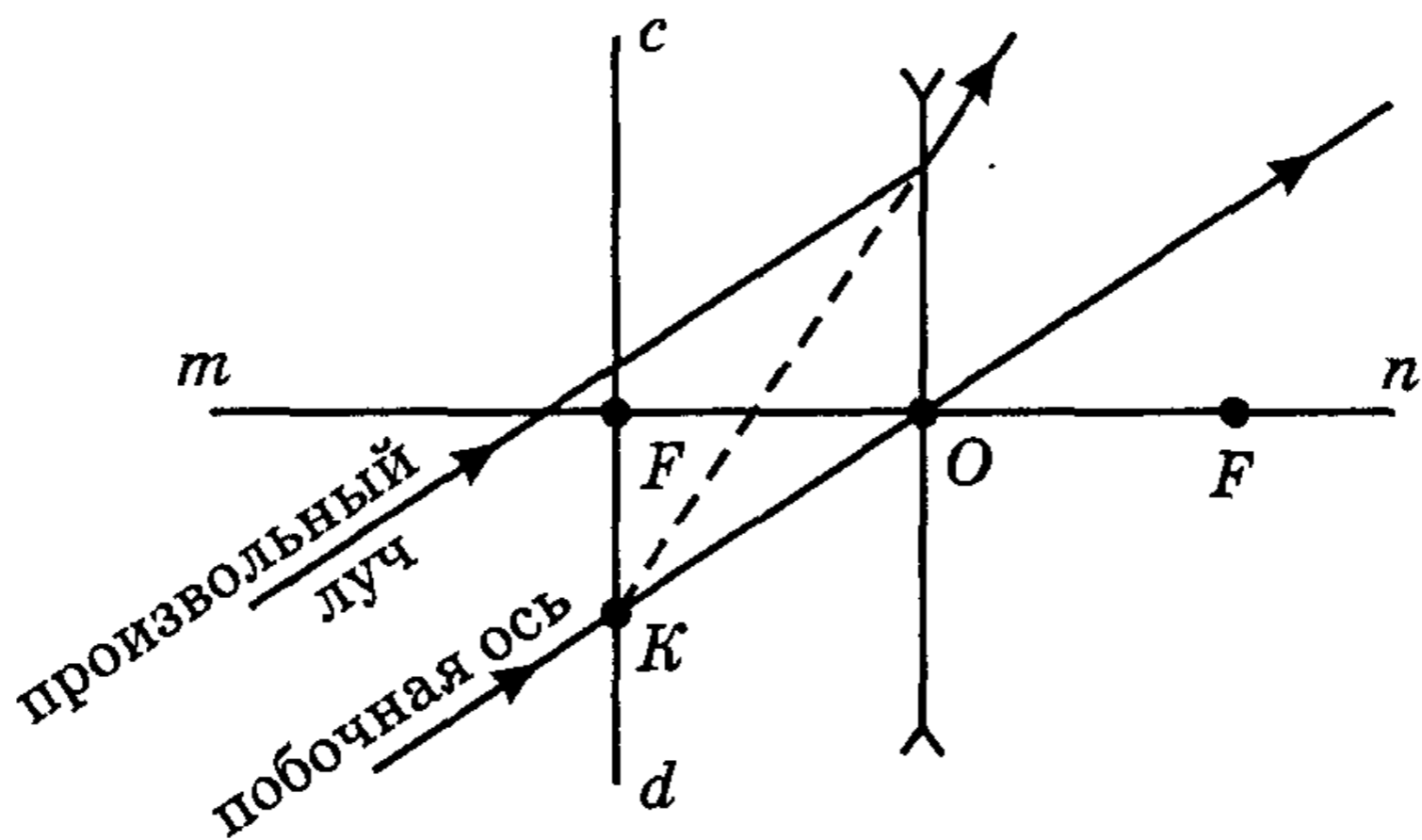


Рис. 215

Мнимые лучи и мнимые изображения предметов принято показывать штриховыми линиями.

Чтобы построить изображение светящейся точки в линзе, надо знать, где пересекутся после преломления испущенные этой точкой два любых луча.

Лучше выбрать лучи, про которые вы знаете, как они пойдут после преломления.

Повторим их еще раз:

- а) луч, идущий по главной оптической оси любой линзы, не преломляется;
- б) побочная ось, т. е. луч, проходящий через главный оптический центр  $O$  любой линзы, не преломляется;
- в) луч, падающий на собирающую линзу параллельно главной оптической оси, после преломления пойдет через фокус линзы;
- г) луч, падающий на собирающую линзу через ее фокус, после преломления пойдет параллельно главной оптической оси линзы;
- д) произвольный луч после преломления в собирающей линзе пойдет через точку фокальной плоскости, в которой пересечет эту плоскость параллельная произвольному лучу побочная ось;
- е) луч, падающий на рассеивающую линзу параллельно ее главной оптической оси, преломится так, что его мнимое продолжение пойдет через фокус, а сам луч — в направлении, противоположном мнимому продолжению;
- ж) произвольный луч, упавший на рассеивающую линзу, преломится так, что его мнимое продолжение пойдет через точку, в которой пересечет главную фокальную плоскость линзы побочная ось, параллельная произвольному лучу.

Пользуясь этими правилами, несложно построить изображение точки или предмета в собирающей и рассеивающей линзах.

Чтобы построить изображение точки  $M$ , лежащей на главной оптической оси собирающей линзы, проведите из этой точки к линзе два луча: один по главной оптической оси, а второй — произвольный. Первый пойдет, как шел, поэтому надо построить после преломления только произвольный луч, руководствуясь рис. 211 и пунктом  $d$ . Точка пересечения этих преломленных лучей и будет изображением  $M_1$  точки  $M$ .

Если точка  $M$  лежит за двойным фокусом  $2F$  собирающей линзы, то ее действительное изображение  $M_1$  окажется между фокусом и двойным фокусом по другую сторону линзы (рис. 216, а). Если точка  $M$  лежит в двойном фокусе этой линзы, то ее действительное изображение тоже окажется в двойном фокусе по другую сторону линзы (рис. 216, б). Если точка  $M$  лежит между двойным фокусом  $2F$  и фокусом  $F$ , то ее действи-

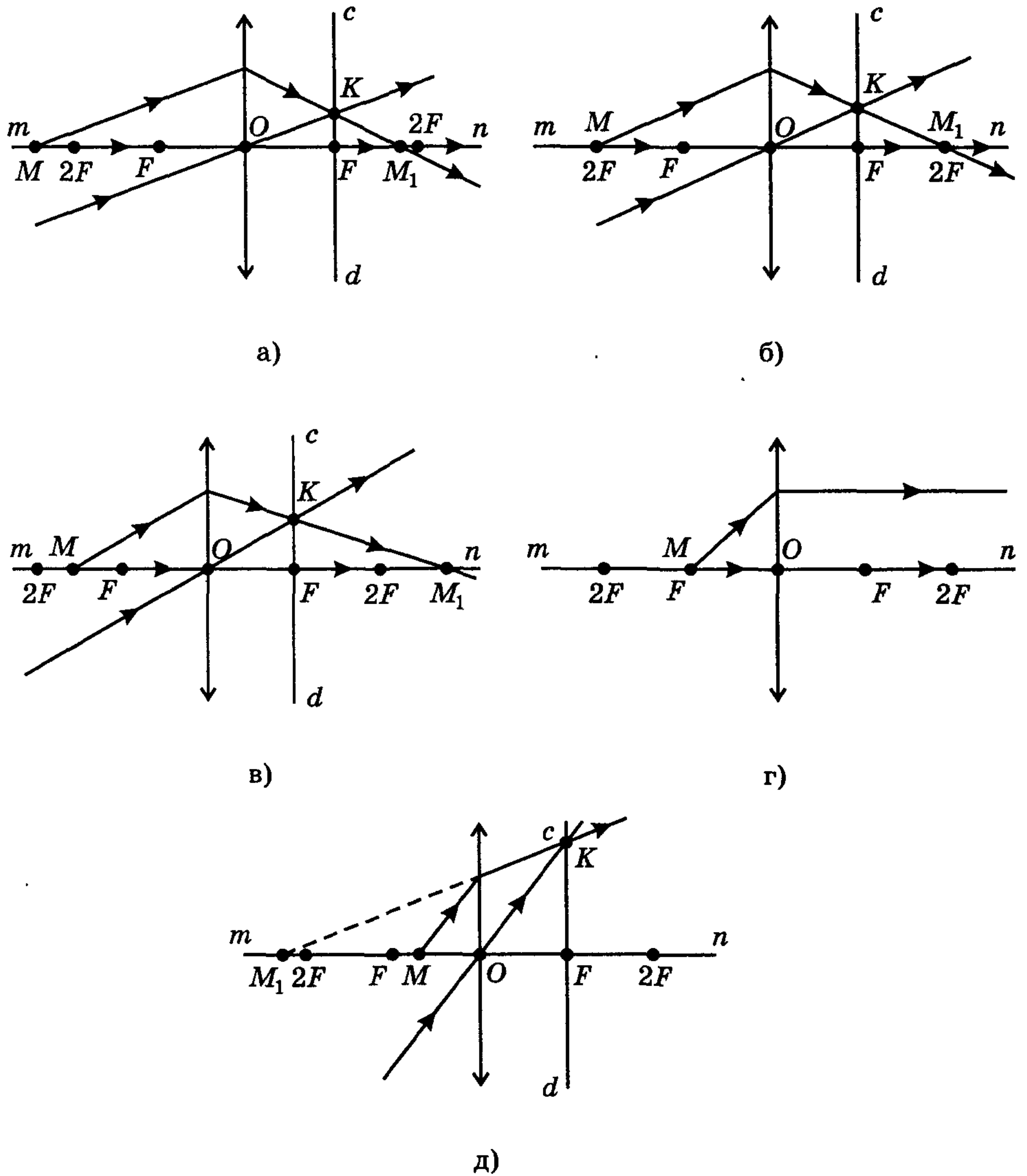


Рис. 216

тельное изображение  $M_1$  окажется за  $2F$  по другую сторону линзы (рис. 216, в). Если точка  $M$  лежит в фокусе линзы, то ее изображение уйдет в бесконечность (рис. 216, г). И наконец, если точка  $M$  лежит между фокусом  $F$  и линзой, то ее мнимое изображение  $M_1$  окажется с той же стороны линзы, что и точка  $M$  (рис. 216, д).

Чтобы построить изображение предмета  $AB$ , надо сначала построить изображение точки  $A$ , не лежащей на главной оптической оси. Для этого из точки  $A$  проведем к линзе луч, параллельный главной оптической оси, — после преломления он пойдет через фокус. Затем из этой же точки  $A$  проведем через главный оптический центр линзы  $O$  побочную ось. Точка  $A_1$ , в которой после преломления пересекутся эти два луча, и будет изображением точки  $A$ . Если предмет  $AB$  был перпендикулярен главной оптической оси  $mn$ , опустим из точки  $A_1$  на главную оптическую ось перпендикуляр и в его основании на оси получим изображение  $B_1$  точки  $B$ .

Если предмет  $AB$  находится за двойным фокусом собирающей линзы, то его действительное изображение  $A_1B_1$  будет обратным (перевернутым), уменьшенным и расположится между фокусом  $F$  и двойным фокусом  $2F$  по другую сторону линзы (рис. 217, а). Если предмет  $AB$  расположен в двойном фокусе  $2F$ , то его действительное изображение  $A_1B_1$  будет обратным, равным по размерам самому предмету и тоже расположенным в двойном фокусе по другую сторону линзы (рис. 217, б). Если предмет  $AB$  находится между двойным фокусом  $2F$  и фокусом  $F$ , то его действительное изображение  $A_1B_1$  будет увеличенным, обратным и расположится за  $2F$  по другую сторону линзы (рис. 217, в). Если предмет  $AB$  находится в фокусе линзы  $F$ , то его изображение уйдет в бесконечность (рис. 217, г). И наконец, если предмет  $AB$  находится между фокусом  $F$  и линзой, то его мнимое изображение  $A_1B_1$  в собирающей линзе будет прямым, увеличенным и расположится с той же стороны линзы, что и сам предмет  $AB$  (рис. 217, д).

В рассеивающей линзе изображение  $M_1$  точки  $M$  будет всегда мнимым и расположенным на главной оптической оси с той же стороны линзы, что и точка  $M$  (рис. 218). Изображение  $A_1B_1$  предмета  $AB$  располо-

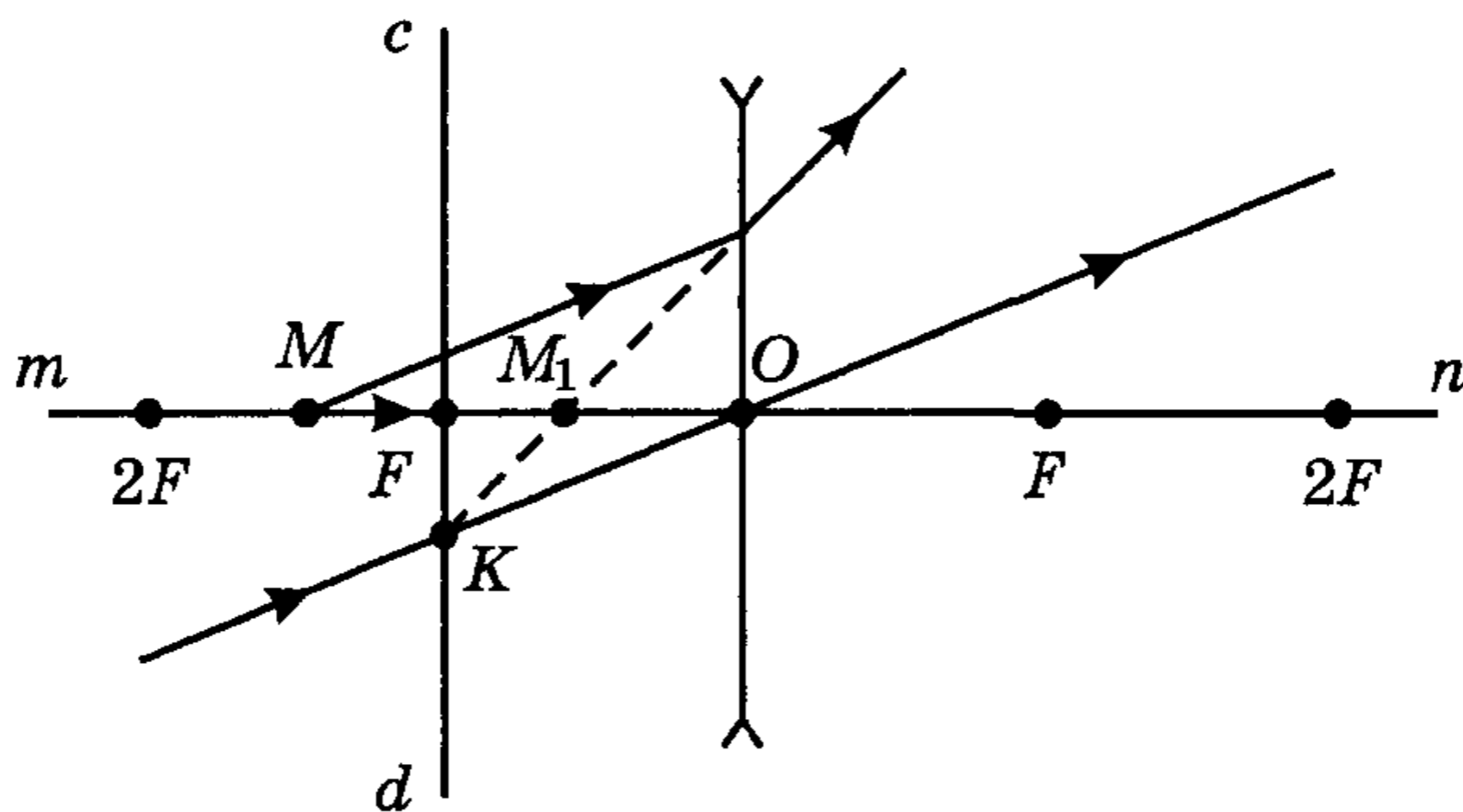


Рис. 218



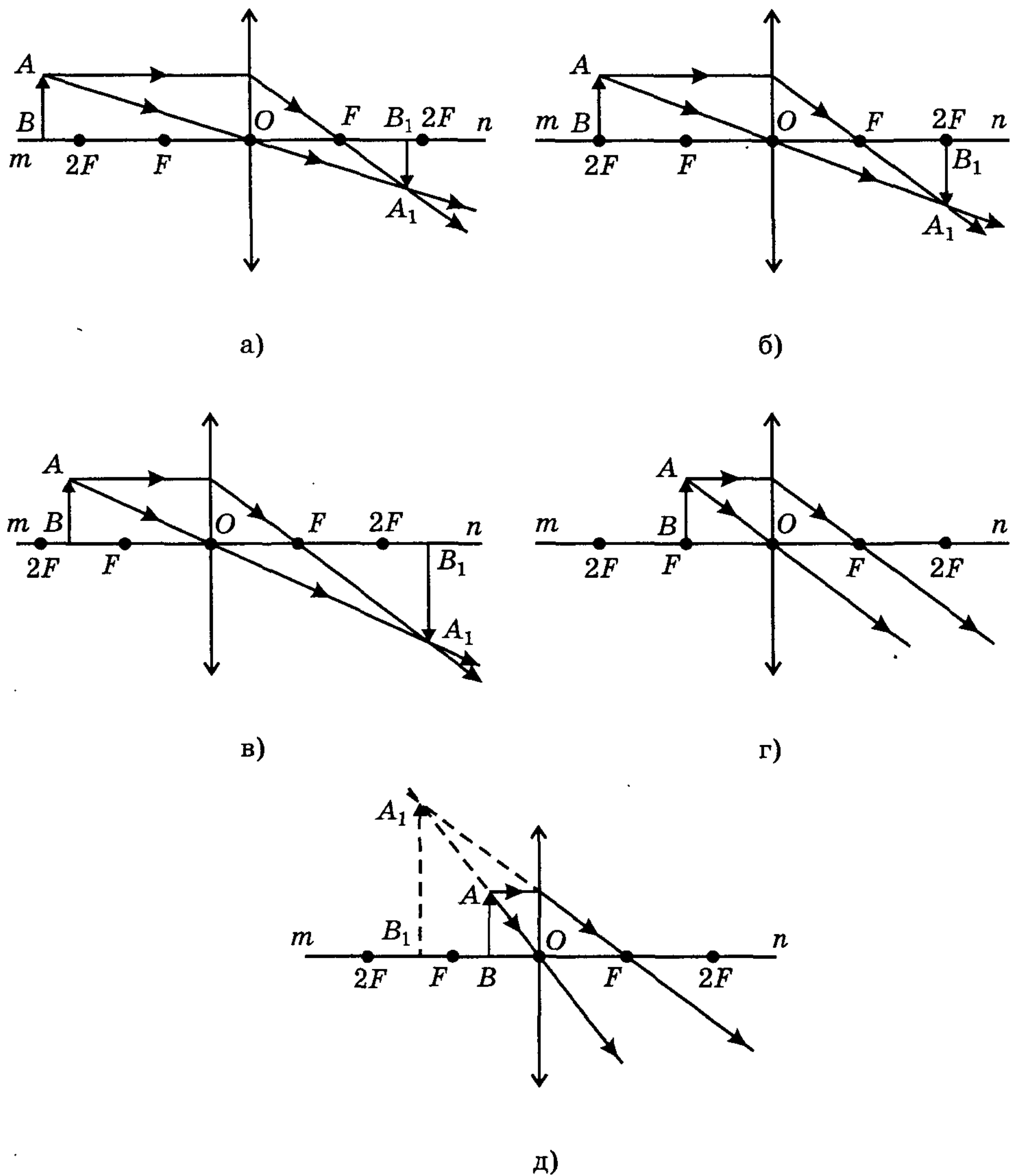


Рис. 217

жится по ту же сторону линзы, что и сам предмет, и будет всегда мнимым, прямым и уменьшенным (этим оно отличается от мнимого изображения в собирающей линзе, там оно увеличенное, см. рис 217, д).

Если предмет  $AB$  не перпендикулярен главной оптической оси  $mn$ , то строить его изображение так, как показано на рис. 217 и 219, нельзя.

В этом случае надо отдельно построить изображение  $A_1$  точки  $A$  и отдельно — изображение  $B_1$  точки  $B$ , лежащей на главной оптической оси, как мы это делали на рис. 216, а затем эти изображения соединить (рис. 220). Предмет и его изображение не будут параллельны друг другу, они расположены наклонно к главной оптической оси под разными углами.

Если требуется построить изображение предмета  $AB$  в системе собирающая линза — плоское зеркало, то сначала постройте изображение  $A_1B_1$  в линзе (рис. 221, а). Это изображение  $A_1B_1$  станет предметом по отношению к зеркалу. Затем постройте изображение  $A_2B_2$  предмета  $A_1B_1$  уже в плоском зеркале (рис. 221, б). Это изображение  $A_2B_2$  станет вторым предметом по отношению к линзе. И, наконец, постройте еще одно изображение  $A_3B_3$  предмета  $A_2B_2$  в линзе (рис. 221, в). Изображение  $A_3B_3$  будет окончательным изображением предмета  $AB$ , даваемым системой линза — зеркало.

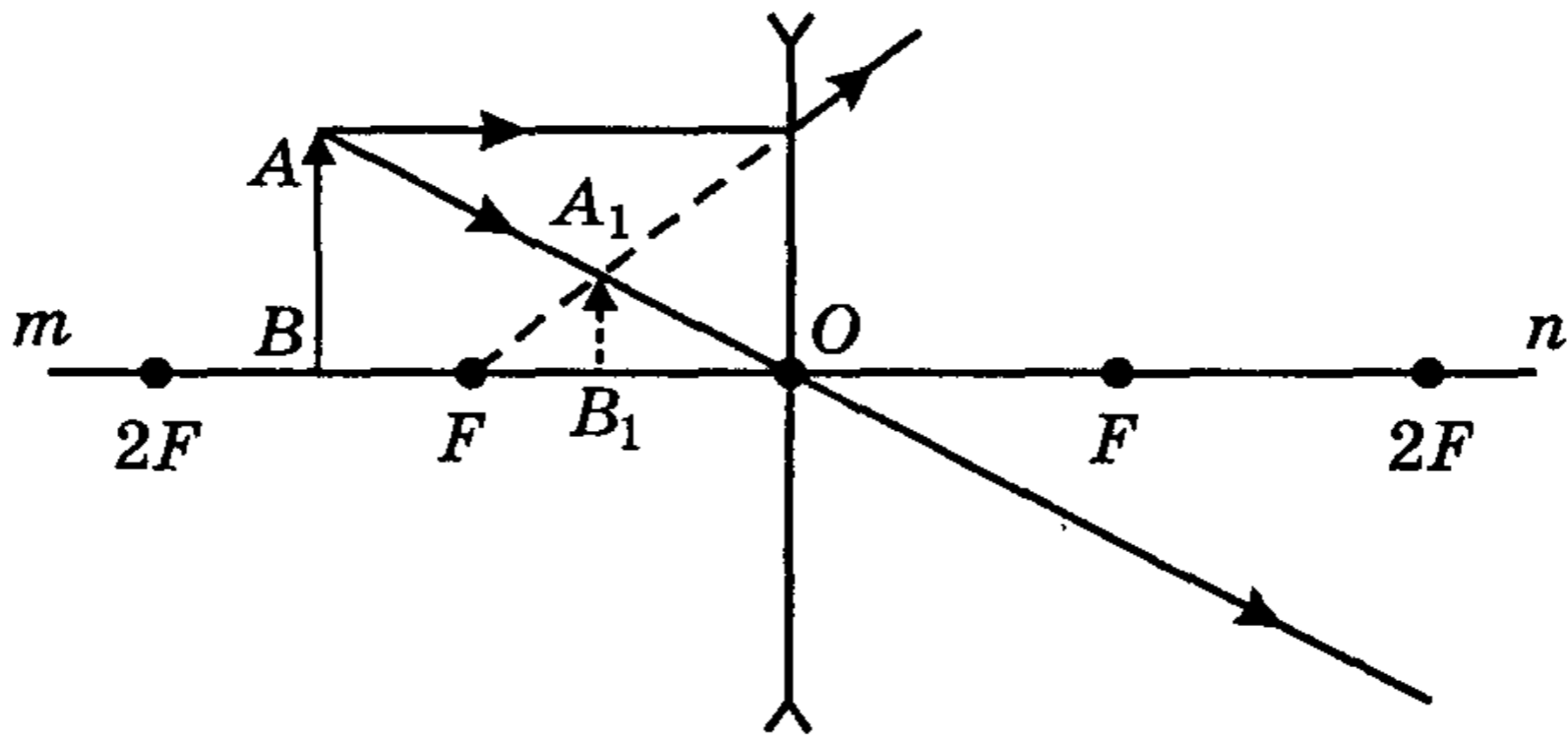


Рис. 219

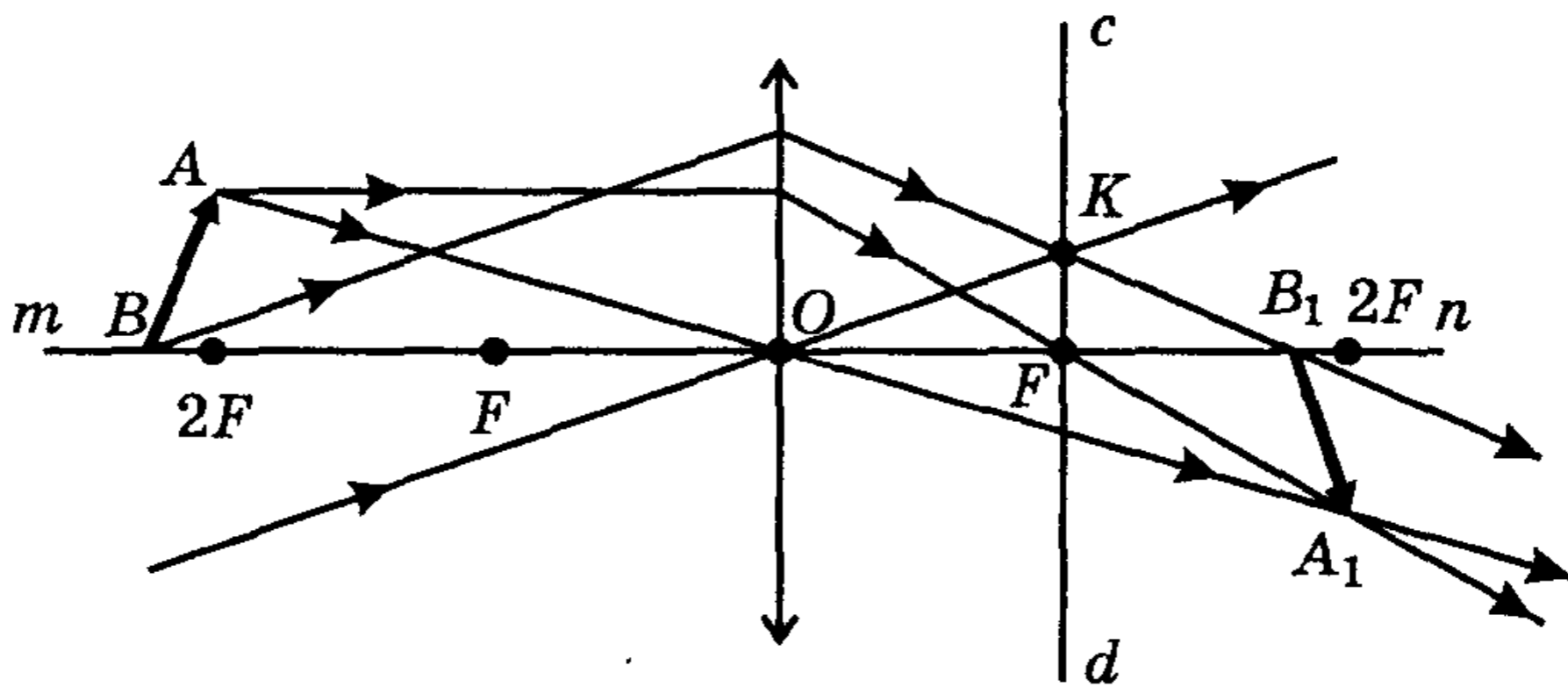


Рис. 220

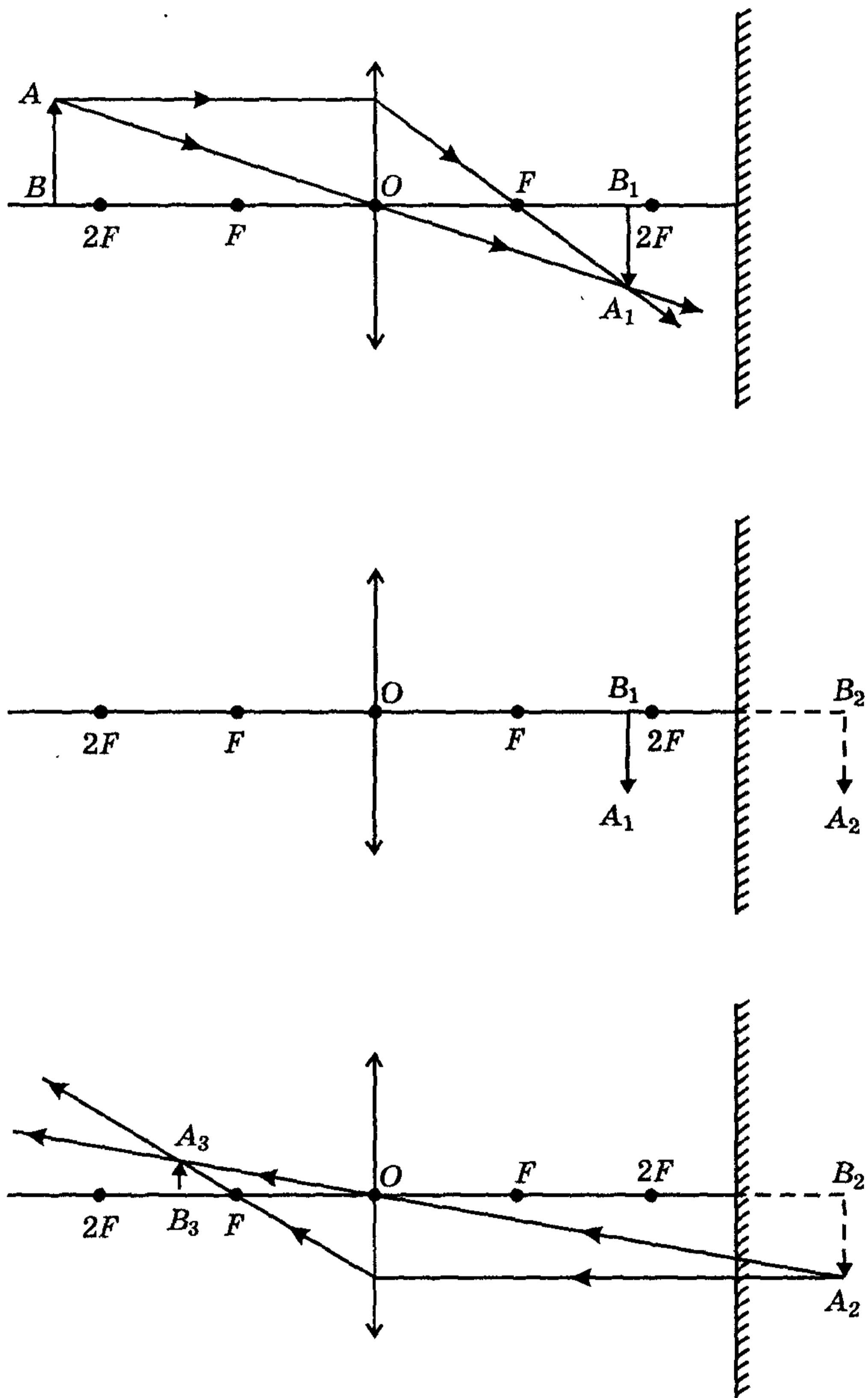


Рис. 221

Если требуется построить изображение предмета в системе двух линз, например, собирающих, то сначала постройте изображение  $A_1B_1$  предмета  $AB$  в первой, левой линзе (рис. 222). Это изображение  $A_1B_1$  станет предметом для второй, правой линзы. Теперь постройте изображение  $A_2B_2$  предмета  $A_1B_1$  в правой линзе. Это изображение  $A_2B_2$  и станет окончательным изображением предмета  $AB$ , даваемым этой системой линз.

Если одна из линз рассеивающая, то порядок построения окончательного изображения тот же, только надо учитывать расположение изображения в рассеивающей линзе или в собирающей, если изображение мнимое (рис. 217, д) или рис. 219).

Величина  $D$ , обратная фокусному расстоянию, называется *оптической силой линзы* (формула 286):

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

Оптическая сила линзы — скалярная алгебраическая величина, т. е. она может быть положительной и отрицательной. Положительной считается оптическая сила собирающей линзы, а отрицательной — рассеивающей.

Единица оптической силы линзы — *диоптрия* (дптр): дптр = м<sup>-1</sup>.

Расстояние от предмета до линзы  $d$  и расстояние от линзы до изображения  $f$  связывает с фокусным расстоянием линзы  $F$  и ее оптической силой  $D$  формула линзы (285):

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = D.$$

Если линза собирающая, но изображение в ней мнимое, то эта формула принимает вид:

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

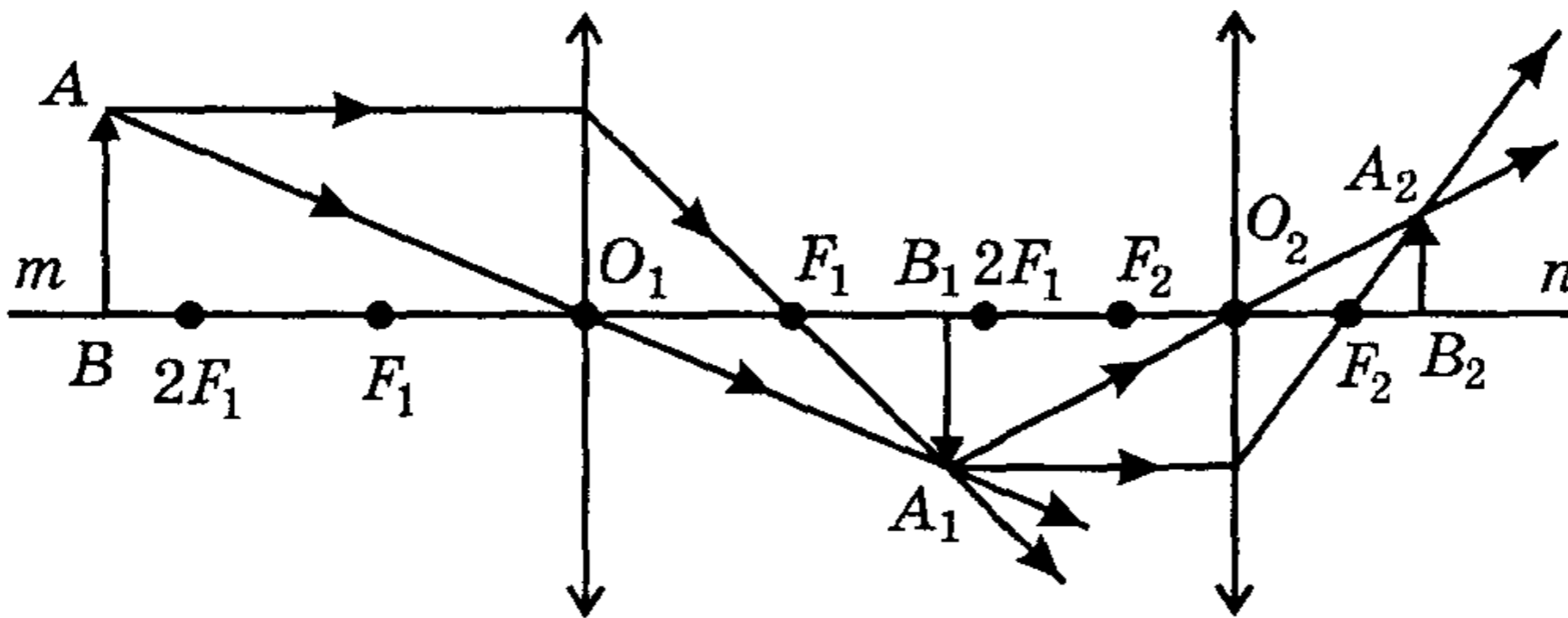


Рис. 222

Если линза рассеивающая, то формула линзы принимает вид:

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

Если на линзу падает пучок сходящихся лучей, то точка их пересечения представляет собой мнимый предмет. В этом случае перед  $\frac{1}{d}$  надо ставить минус.

*Увеличением линзы  $\Gamma$*  называют отношение линейного размера изображения  $H$  к линейному размеру предмета  $h$  (формулы 287) и 288):

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

*Лупой называют короткофокусную собирающую линзу, предназначенную для относительно небольшого увеличения изображения.* Рассматриваемый предмет помещают между фокусом и лупой (рис. 217, д), благодаря чему получают прямое и увеличенное изображение. Увеличение лупы определяет формула 289):

$$\Gamma = \frac{d_0}{F},$$

где  $d_0 = 0,25$  — расстояние наилучшего зрения.

Если у человека нормальное зрение, то параллельные лучи, падающие на хрусталик глаза, пересекаются на сетчатке. При этом формула линзы имеет вид:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = D_{\text{глаза}}.$$

У близорукого человека параллельные лучи, упав на утолщенный хрусталик, пересекаются внутри глаза перед сетчаткой. Чтобы они пересекались на сетчатке, требуются очки со стеклами, аналогичными рассеивающей линзе. Применительно к глазу в таких очках формула линзы имеет вид:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = D_{\text{глаза}} - D_{\text{очков}}.$$

Если в условии задачи записано: оптическая сила рассеивающей линзы  $D = -4$  дптр, то в формулу подставляйте только модуль этого числа, т. к. минус в ней уже учтен.

У дальнозоркого человека параллельные лучи, упав на хрусталик, пересекутся за сетчаткой. Чтобы восстановить зрение, требуются очки со стеклами, аналогичными собирающей линзе. Применительно к дальнозоркому глазу формула линзы имеет вид:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = D_{\text{глаза}} + D_{\text{очков}}.$$

Если линзы сложены вплотную, то оптическая сила системы таких линз равна алгебраической сумме оптических сил каждой линзы в отдельности — с учетом их знаков. Например, если сложили вплотную собирающую линзу с фокусным расстоянием  $F_1 = 20$  см и рассеивающую с фокусным расстоянием  $F_2 = 25$  см, то оптическая сила такой системы линз будет равна:

$$D = \frac{1}{F_1} - \frac{1}{F_2} = \frac{1}{0,2\text{м}} - \frac{1}{0,25\text{м}} = 1 \text{ дптр}.$$

При вычислении оптической силы не забывайте переводить размерность фокусных расстояний — сантиметры в метры, иначе допустите грубую ошибку.

Если линзы расположены на расстоянии друг от друга, то определять оптическую силу или фокусное расстояние такой системы линз подобным образом — просто складывая оптические силы каждой линзы — нельзя. В этом случае фокусным расстоянием  $F$  такой системы линз является расстояние от последнего пересечения лучей, упавших на первую линзу параллельно ее главной оптической оси, до последней линзы (рис. 223).

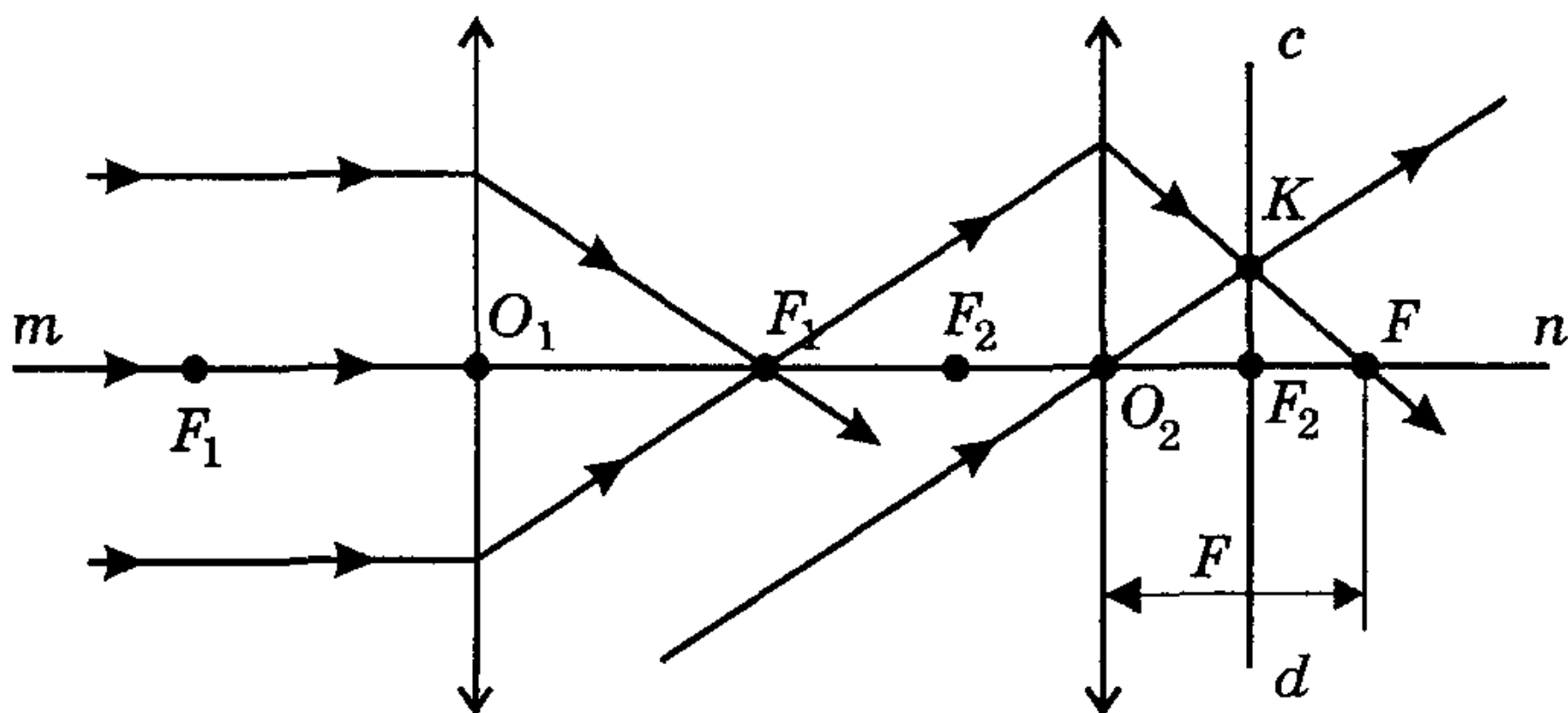
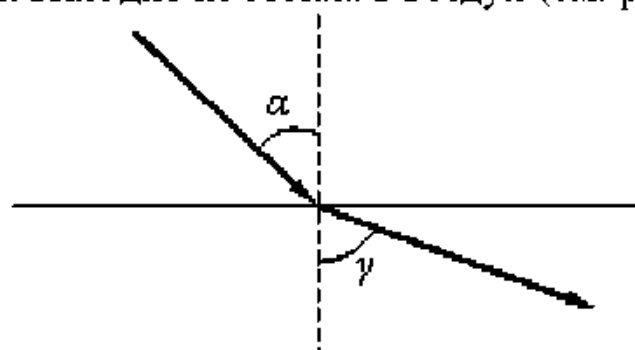


Рис. 223

## Геометрическая оптика

1. В 3 № 2705. Световой пучок выходит из стекла в воздух (см. рисунок).



Что происходит при этом с частотой электромагнитных колебаний в световой волне, скоростью их распространения, длиной волны?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличивается;
- 2) уменьшается;
- 3) не изменяется.

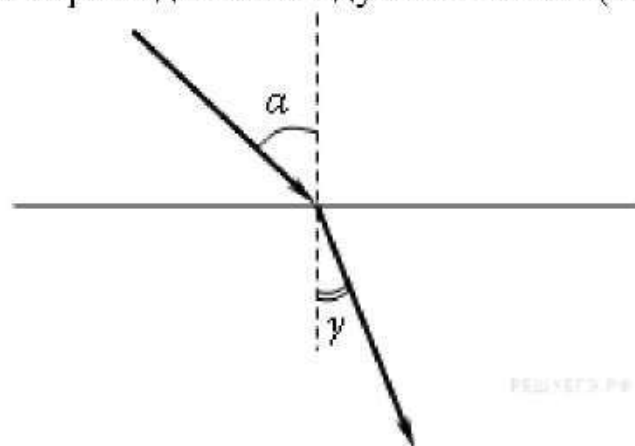
Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Частота	Скорость	Длина волны
?	?	?

**Решение.**

При переходе светового пучка из стекла в воздух частота электромагнитных колебаний в световой волне не изменяется, поскольку она не зависит от того, в какой среде распространяется волна. Так как стекло является оптически более плотной средой, чем воздух, при выходе из стекла скорость распространения световой волны увеличивается. В свою очередь, длина волны связана с частотой электромагнитных колебаний и скоростью распространения соотношением  $\lambda \nu = v$ . В виду неизменности частоты и увеличения скорости отсюда следует, что длина волны увеличивается.

2. В 3 № 2706. Световой пучок переходит из воздуха в стекло (см. рисунок).



Что происходит при этом с частотой электромагнитных колебаний в световой волне, скоростью их распространения, длиной волны?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличивается;
- 2) уменьшается;
- 3) не изменяется.

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Частота	Скорость	Длина волны
?	?	?

**Решение.**

При переходе светового пучка из воздуха в стекло частота электромагнитных колебаний в световой волне не изменяется, поскольку она не зависит от того, в какой среде распространяется волна. Так как стекло является оптически более плотной средой, чем воздух, при переходе в стекло скорость распространения световой волны уменьшается. В свою очередь, длина волны связана с частотой электромагнитных колебаний и скоростью распространения соотношением  $\lambda \nu = v$ . В виду неизменности частоты и уменьшения скорости отсюда следует, что длина волны уменьшается.

3. В 3 № 3114. Предмет находится перед собирающей линзой между фокусным и двойным фокусным расстоянием. Как изменятся расстояние от линзы до его изображения, линейный размер изображения предмета и вид изображения (мнимое или действительное) при перемещении предмета на расстояние больше двойного фокусного ( $d > 2F$ )?

**ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ**

- А. Расстояние от линзы до изображения предмета
- Б. Линейный размер изображения предмета
- В. Вид изображения предмета

**ИЗМЕНЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ**

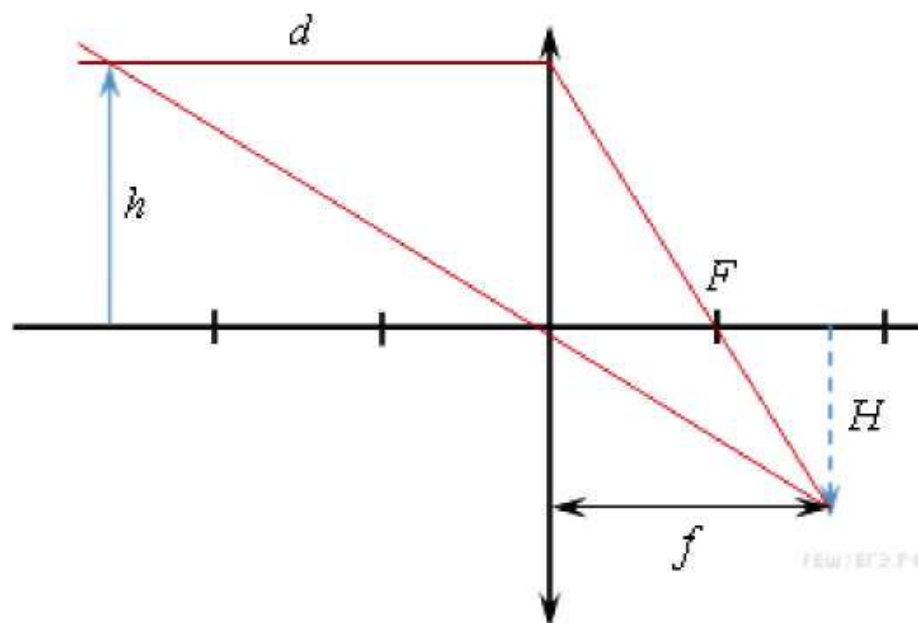
- 1) Увеличивается
- 2) Уменьшается
- 3) Не изменится

А	Б	В
?	?	?



**Решение.**

Собирающая линза дает действительное изображение предмета, если он удален от линзы на расстояние, большее чем фокусное. Следовательно, при переносе предмета из положения между фокусным и двойным фокусным расстояниями на расстояние, большее двойного фокусного, вид изображения не изменится, он останется действительным (В — 3). Согласно формуле тонкой линзы, расстояние от предмета до линзы, расстояние от линзы до изображения и фокусное расстояние связаны соотношением  $\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$ . Следовательно, в результате переноса расстояние от линзы до изображения уменьшится (А — 2).



Из рисунка видно, что линейные размеры предмета и изображения связаны с расстояниями от предмета и изображения до линзы соотношением  $\frac{H}{h} = \frac{f}{d}$ . Таким образом, при удалении предмета, линейный размер изображения будет уменьшаться (Б — 2).

**4. В 3 № 3154.** Небольшой предмет находится на главной оптической оси тонкой собирающей линзы, на двойном фокусном расстоянии от нее. Как изменятся при удалении предмета от линзы следующие три величины: размер изображения, его расстояние от линзы, оптическая сила линзы? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличится;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится.

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Размер изображения	Расстояние изображения от линзы	Оптическая сила линзы
?	?	?

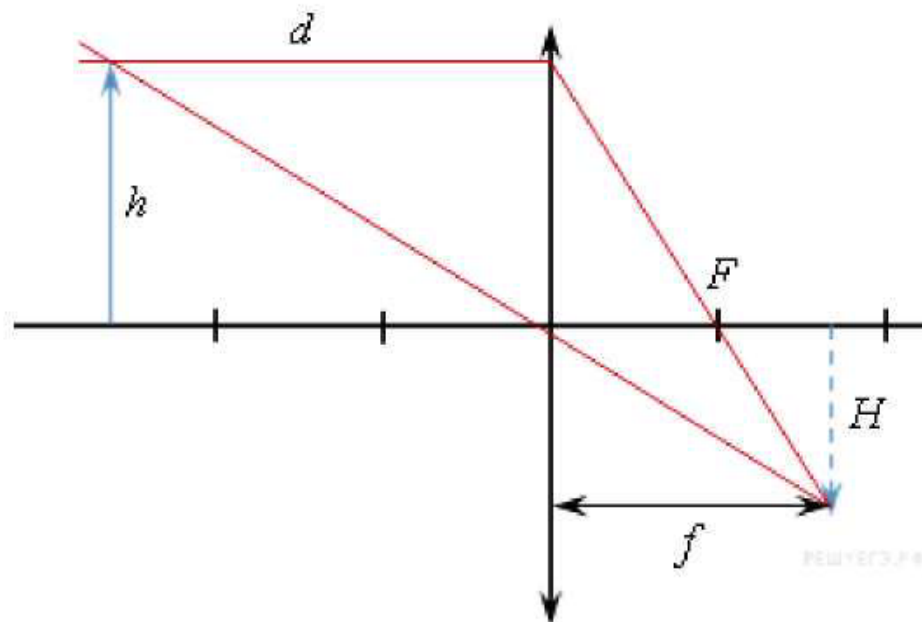
*Пояснение.* В исходных условиях изображение предмета, даваемое линзой, — перевернутое, причем таких же размеров, что и оригинал. В соответствии с формулой тонкой линзы, чем дальше от линзы будет предмет при тех же исходных условиях, тем ближе к ней будет его изображение. Что же касается оптической силы линзы, то она, как и фокусное расстояние, является характеристикой линзы и не зависит от расположений предмета и его изображения.

**Решение.**

Оптическая сила линзы (величина, обратная к фокусному расстоянию) является характеристикой самой линзы, поэтому при удалении предмета от линзы она никак не изменяется. Согласно формуле тонкой линзы расстояние от предмета до линзы, расстояние от изображения до линзы и фокусное расстояние связаны соотношением

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$$

Следовательно при удалении предмета от линзы изображение будет приближаться к линзе. Из рисунка видно, что линейные размеры предмета и изображения связаны с расстояниями от предмета и изображения до линзы соотношением  $\frac{H}{h} = \frac{f}{d}$ . Таким образом, при удалении предмета, размер изображения будет уменьшаться.



**5. В 3 № 3155.** Установите соответствие между оптическими приборами и разновидностями изображений, которые они дают. К каждой позиции первого столбца подберите нужную позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

**ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ**

- А) плоское зеркало
- Б) фотоаппарат

**РАЗНОВИДНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

- 1) прямое, мнимое
- 2) перевёрнутое
- 3) прямое, действительное
- 4) перевёрнутое, мнимое

А	Б
?	?

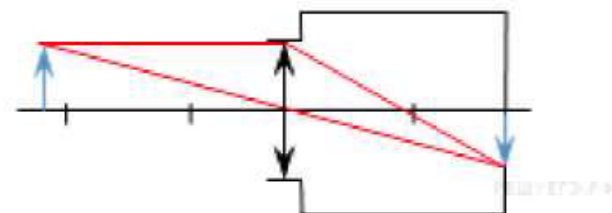
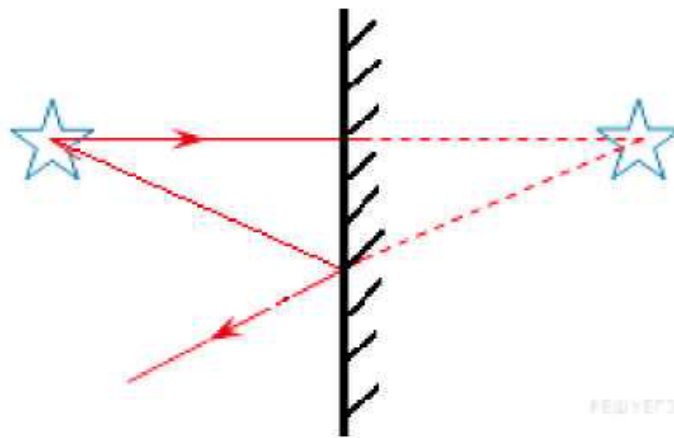
*Пояснение.* Выполняя это задание, полезно задать себе наводящий вопрос: какими лучами удобно воспользоваться для построения изображения в случае названных двух приборов? Ответ на него поможет решить два других вопроса:

- 1) изображение прямое или перевернутое?
- 2) оно действительное или мнимое?

Ответы на них очевидны — при условии, что вы представляете себе, что такое плоское зеркало и как устроен простейший фотоаппарат.

**Решение.**

Плоское зеркало дает прямое мнимое изображение (А — 1). Объектив простейшего фотоаппарата представляет собой собирающую линзу, которая дает действительное изображение на фотопластинке. При этом изображение получается перевернутым. Следовательно, правильный ответ среди перечисленных: Б — 2.



**6. В 3 № 3156.** Луч света падает на границу раздела «стекло — воздух». Как изменятся при увеличении показателя преломления стекла следующие три величины: длина волны света в стекле, угол преломления, угол полного внутреннего отражения? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличится;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится.

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

Длина волны света в стекле	Угол преломления	Угол полного внутреннего отражения
?	?	?

**Решение.**

При переходе светового пучка из стекла в воздух частота электромагнитных колебаний в световой волне не изменяется, поскольку она не зависит от того, в какой среде распространяется волна. Длина волны связана с частотой электромагнитных колебаний и скоростью распространения соотношением  $\lambda \nu = v$ . При увеличении показателя преломления, скорость распространения световой волны в среде уменьшается, а значит, уменьшается и длина волны света в стекле. Согласно закону преломления Снеллиуса, синусы углов падения и преломления при выходе света из стекла в воздух связаны с показателем преломления стекла соотношением  $\frac{\sin \alpha_{\text{пад}}}{\sin \gamma_{\text{прел}}} = \frac{1}{n}$ . Следовательно, при увеличении показателя преломления, угол преломления будет увеличиваться. Наконец, угол полного внутреннего отражения определяется соотношением  $\sin \alpha_{\text{полн.внутр.отраж}} = \frac{1}{n}$ . Таким образом, увеличение  $n$  приведет к уменьшению угла полного внутреннего отражения.

7. В 3 № 3157. Установите соответствие между разновидностями тонкой линзы и результатами преломления в ней параллельных лучей. К каждой позиции первого столбца подберите нужную позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

### РАЗНОВИДНОСТИ ТОНКОЙ ЛИНЗЫ

- А) собирающая
- Б) рассеивающая

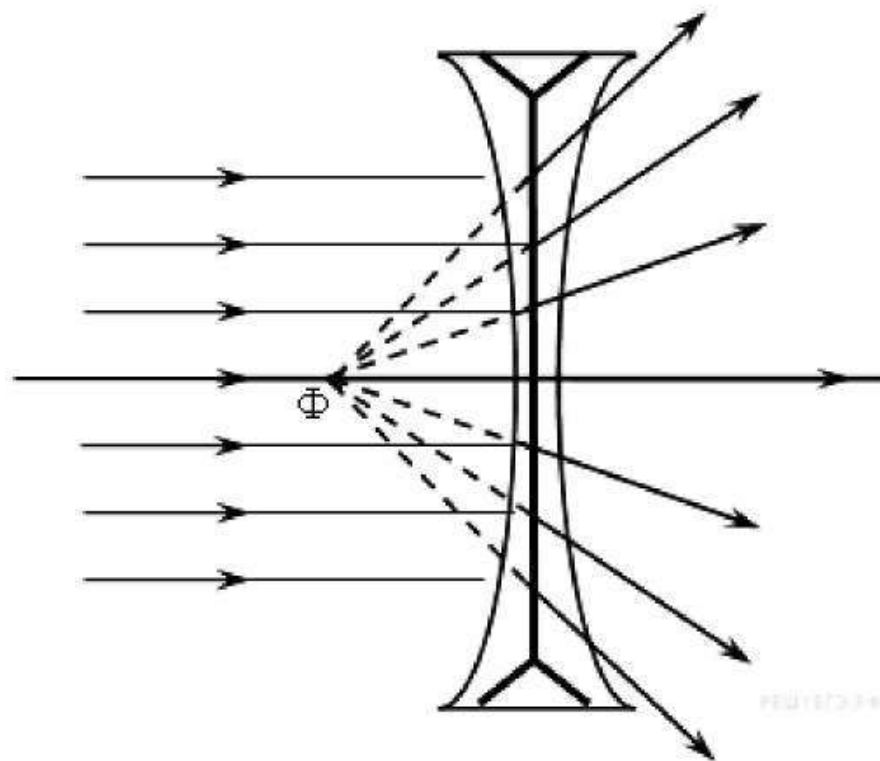
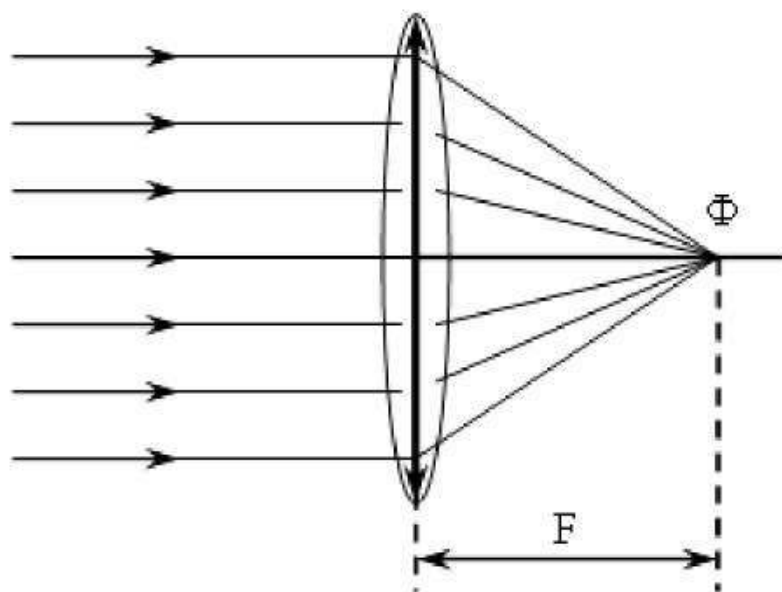
### РЕЗУЛЬТАТ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛУЧЕЙ

- 1) лучи, параллельные главной оптической оси линзы, пройдя через нее, пройдут затем через ее дальний фокус
- 2) лучи, параллельные главной оптической оси линзы, пройдя через нее, пересекутся затем в ее ближнем фокусе
- 3) лучи, параллельные главной оптической оси линзы, пройдя через нее, будут казаться расходящимися из ее ближнего фокуса
- 4) лучи, параллельные главной оптической оси линзы, пройдя через нее, соберутся в ее дальнем фокусе

А	Б
?	?

### Решение.

Лучи, параллельные главной оптической оси собирающей линзы, пройдя через нее, пройдут затем через ее дальний фокус (А — 1). Лучи, параллельные главной оптической оси рассеивающей линзы, пройдя через нее, будут казаться расходящимися из ее фокуса (Б — 3).



**8. В 3 № 3163.** Пучок света переходит из воздуха в стекло. Частота световой волны  $\nu$ , скорость света в воздухе с показателем преломления стекла относительно воздуха  $n$ . Установите соответствие между физическими величинами и комбинациями других величин, по которым их можно рассчитать. К каждой позиции первого столбца подберите нужную позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

### ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

- А) скорость света в стекле
- Б) длина волны света в стекле

### РАВНЫЕ ИЛИ КОМБИНАЦИИ ДРУГИХ ВЕЛИЧИН

- 1)  $cn$
- 2)  $c\nu$
- 3)  $c/n$
- 4)  $c/(n\nu)$

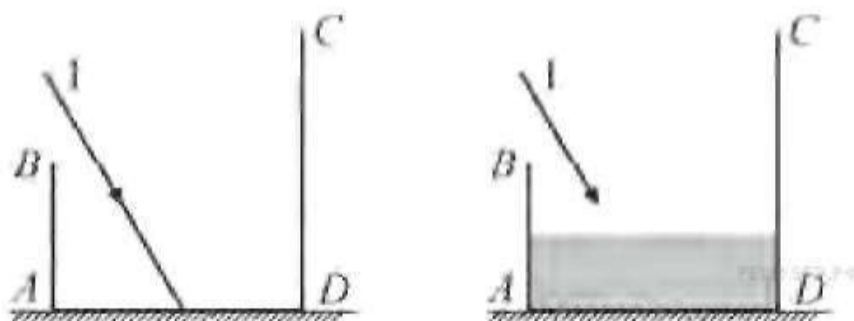
А	Б
?	?

### Решение.

При переходе светового пучка из воздуха в стекло частота электромагнитных колебаний в световой волне не изменяется, поскольку она не зависит от того, в какой среде распространяется волна. Так как стекло является оптически более плотной средой, чем воздух, при переходе в стекло скорость распространения световой волны уменьшается и оказывается равной  $\nu = \frac{c}{n}$  (А — 3). В свою очередь, длина волны связана с частотой электромагнитных колебаний и скоростью распространения соотношением  $\lambda \nu = v$ . Следовательно, длина волны света в стекле равна  $\lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{c}{n\nu}$  (Б — 4).

9. В 3 № 4363. На столе стоит сосуд с зеркальным дном и матовыми стенками. На дно пустого сосуда падает луч света  $l$ . На стенке  $CD$  сосуда при этом можно наблюдать «зайчик» — блик отражённого луча. В сосуд наливают некоторое количество воды. Как при этом изменяются следующие физические величины: угол падения луча на дно, высота точки нахождения «зайчика», расстояние от точки отражения луча от дна сосуда до стенки  $CD$ ?

Отражением луча от поверхности жидкости пренебречь.



Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличится;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится.

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

#### ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

А) угол падения луча на дно

Б) высота точки нахождения «зайчика»

В) расстояние от точки отражения луча от дна до стенки  $CD$

#### ИХ ИЗМЕНЕНИЕ

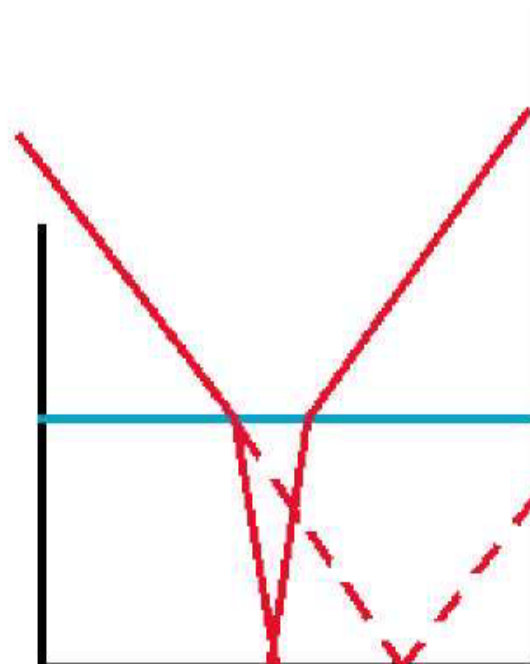
- 1) увеличится
- 2) уменьшится
- 3) не изменится сосуда

А	Б	В

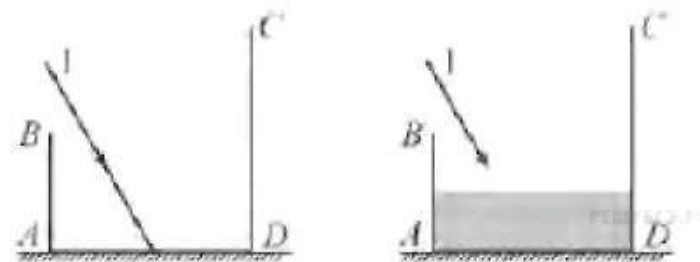
#### Решение.

Вода является оптически более плотной средой, чем воздух. Поэтому угол преломления света при прохождении в воду меньше угла падения. Следовательно, луч «загибается» вниз. При этом точка отражения от дна, естественно, смещается налево, то есть расстояние от точки отражения луча от дна до стенки  $CD$  увеличивается (В — 1). Угол падения луча на дно уменьшается (А — 2). Наконец, высота точки нахождения «зайчика» увеличивается (Б — 1).

Правильный ответ: 211



**10. В 3 № 4398.** На столе стоит сосуд с зеркальным дном и матовыми стенками. На дно пустого сосуда падает луч света  $I$ . На стенке  $CD$  сосуда при этом можно наблюдать «зайчик» — блик отраженного луча. В сосуд наливают некоторое количество воды. Как при этом изменяются следующие физические величины: угол падения луча на стенку  $CD$ , расстояние от стенки  $AB$  до точки отражения луча от дна сосуда, угол отражения луча от зеркала? Отражением луча от поверхности жидкости пренебречь.



Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличится;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится.

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

#### ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

- А) угол падения луча на стенку  $CD$
- Б) расстояние от стенки  $AB$  до точки отражения от дна сосуда
- В) угол отражения луча от зеркала

#### ИХ ИЗМЕНЕНИЕ

- 1) увеличится
- 2) уменьшится
- 3) не изменится сосуда

А	Б	В

#### Решение.

Вода является оптически более плотной средой, чем воздух. Поэтому угол преломления света при прохождении в воду меньше угла падения. Следовательно, луч «загибается» вниз. При этом точка отражения от дна, естественно, смещается налево, то есть расстояние от точки отражения луча от дна до стенки  $AB$  уменьшается (Б — 2). Угол отражения луча от дна равен углу преломления, он уменьшается (В — 2). Наконец, угол падения луча на стенку  $CD$  сосуда не изменяется (А — 3).

Правильный ответ: 322

