



Всероссийская школа математики и физики «Авангард»

Е. Н. ФИЛАТОВ

Ф И З И К А

11

Экспериментальный учебник

Часть 4

*Геометрическая и волновая оптика.
Квантовая физика*

Москва 2010



Всероссийская школа математики и физики «Авангард»

Е. Н. ФИЛАТОВ

Ф И З И К А

11

*Экспериментальный учебник для профильных
физико-математических классов*

Часть 4

*Геометрическая и волновая оптика.
Квантовая физика*

Москва 2010

Филатов Е.Н. Физика–11. Часть 4. Геометрическая и волновая оптика. Квантовая физика. Экспериментальный учебник для профильных физико-математических классов. – М.: ВШМФ «Авангард», 2010. – 532 с.

Учебник предназначен для учащихся 11-х профильных физико-математических классов. Главная цель учебника – научить учащихся самостоятельно решать задачи, поэтому большое количество задач предлагается для самостоятельного решения.

Все задачи условно разбиты на четыре категории сложности: легкие, средней трудности, трудные, очень трудные. Легкие задачи – это стандартные задачи из традиционных школьных учебников, а очень трудные соответствуют уровню вступительных экзаменов в наиболее престижные вузы Москвы: МФТИ, МГУ, МИФИ.

К большинству задач приведены ответы и подсказки.

© Филатов Е.Н., 2010

© АНО ЗФМЛ «Авангард», 2010

ISBN

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА	
§ 1. Прямолинейное распространение света	4
§ 2. Закон отражения света. Плоское зеркало	19
§ 3. Сферические зеркала	48
§ 4. Преломление света на плоской границе	83
§ 5. Плоскопараллельная пластина	109
§ 6. Призма	128
§ 7. Линзы. Построение изображений	140
§ 8. Формула линзы	170
§ 9. Проекционный аппарат. Фотоаппарат	215
§ 10. Глаз. Угол зрения	225
§ 11. Лупа	248
§ 12. Линза и плоскопараллельная пластина	256
§ 13. Линза и плоское зеркало	269
§ 14. Линза и сферическое зеркало	278
§ 15. Две линзы	291
§ 16. Микроскоп	307
§ 17. Телескоп	318
ВОЛНОВАЯ ОПТИКА	
§ 18. Дисперсия света	334
§ 19. Интерференция света	342
§ 20. Дифракция света	367
§ 21. Инфракрасное, ультрафиолетовое и рентгеновское излучения	405
КВАНТОВАЯ ФИЗИКА	
§ 22. Фотоэффект	413
§ 23. Фотон. Давление света	423
§ 24. Спектры. Постулаты Бора	431
§ 25. Изотопы. Радиоактивность	443
§ 26. Ядерные реакции. Энергия связи	451
§ 27. Ядерный реактор. Термоядерный синтез	464
Подсказки	479
Ответы	518
Периодическая таблица элементов Д.И. Менделеева	532

§ 1. Прямолинейное распространение света

Что такое свет?

По современным представлениям видимый свет представляет собой электромагнитные волны с длинами от 400 нм (фиолетовый цвет) до 760 нм (красный цвет).

Свет, как и все электромагнитные волны, распространяется с очень большой скоростью. В вакууме скорость света составляет около $3 \cdot 10^8$ м/с.

Читатель: Как же удалось измерить такую «чудовищную» скорость?

Автор: Это были очень непростые эксперименты. Расскажем о них по порядку.

Как определили скорость света?

Астрономический метод измерения скорости света. Скорость света впервые удалось измерить датскому ученому Рёмеру¹ в 1676 г. Его успех объясняется именно тем, что проходимые светом расстояния, которые он использовал для измерений, были очень велики. Это расстояния между планетами Солнечной системы.

Рёмер наблюдал затмения спутников Юпитера – самой большой планеты Солнечной системы. Юпитер в отличие от Земли имеет не менее шестнадцати спутников. Ближайший его спутник Ио стал предметом наблюдений Рёмера. Он видел, как спутник проходил перед планетой, а затем погружался в ее тень и пропадал из поля зрения. Затем он опять появлялся, как мгновенно вспыхнувшая лампа. Промежуток времени между двумя вспышками оказался равным 42 ч 28 мин. Таким образом, эта «луна» представляла собой громадные небесные часы, через равные промежутки времени посылавшие свои сигналы на Землю.

¹Оле Рёмер (1644–1710) – датский астроном.

Сначала наблюдения проводились в то время, когда Земля при своем движении вокруг Солнца ближе всего подошла к Юпитеру (рис. 1.1). Зная период обращения спутника Ио вокруг Юпитера, Рёмер составил чёткое расписание моментов его появления на год вперед. Но шесть месяцев спустя, когда Земля удалилась от Юпитера на диаметр своей орбиты, Рёмер с удивлением обнаружил, что спутник опоздал появиться из тени на целых 22 мин по сравнению с «расчетным» моментом времени его появления.

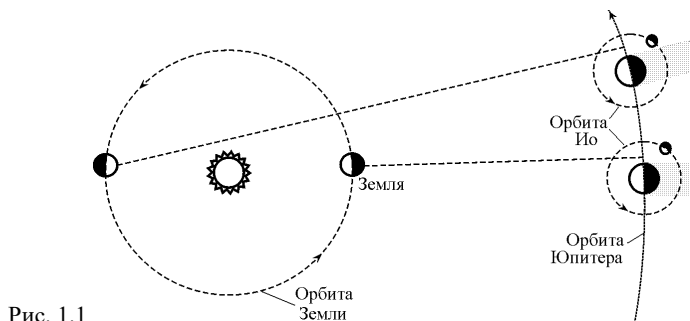


Рис. 1.1

Рёмер объяснял это так: «Если бы я мог остаться на другой стороне земной орбиты, то спутник всякий раз появлялся бы из тени в назначенное время; наблюдатель, находящийся там, увидел бы Ио на 22 мин раньше. Запаздывание в этом случае происходит от того, что свет употребляет 22 мин на прохождение от места моего первого наблюдения до моего теперешнего положения». Зная запаздывание появления Ио и расстояние, которым оно вызвано, можно определить скорость, разделив это расстояние (диаметр орбиты Земли) на время запаздывания. Скорость оказалась чрезвычайно большой, примерно 215 000 км/с. Поэтому-то крайне трудно уловить время распространения света между двумя удаленными точками на Земле. Ведь за одну секунду свет проходит расстояние больше длины земного экватора в 7,5 раза.

Лабораторные методы измерения скорости света. Впервые скорость света лабораторным методом удалось измерить французскому ученому Физо¹ в 1849 г. В его опыте свет от источника, прой-

¹ Арман Ипполит Луи Физо (1819–1896) – французский физик.

дя через линзу, падал на полупрозрачную пластинку 1 (рис. 1.2). После отражения от пластинки сфокусированный узкий пучок направлялся на периферию быстро вращающегося зубчатого колеса.

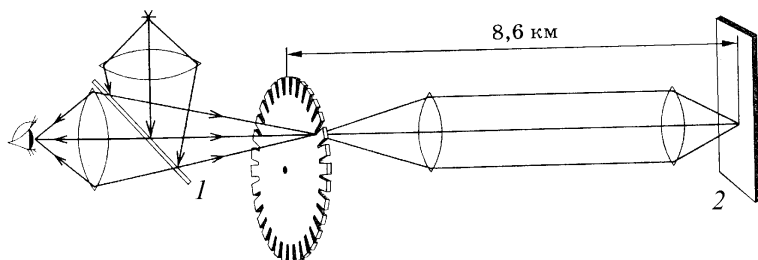


Рис. 1.2

Пройдя между зубцами, свет достигал зеркала 2, находившегося на расстоянии нескольких километров от колеса. Отразившись от зеркала, свет, прежде чем попасть в глаз наблюдателя, должен был опять пройти между зубцами. Когда колесо вращалось медленно, свет, отраженный от зеркала, был виден. При увеличении скорости вращения он постепенно исчезал. В чем же здесь дело? Пока свет, прошедший между двумя зубцами, шел до зеркала и обратно, колесо успевало повернуться так, что на место прорези вставал зубец и свет переставал быть видимым.

При дальнейшем увеличении скорости вращения свет опять становился видимым. Очевидно, что за время путешествия света до зеркала и обратно колесо успело повернуться настолько, что на место прежней прорези встала уже новая прорезь. Зная это время и расстояние между колесом и зеркалом, можно определить скорость света. В опыте Физо расстояние равнялось 8,6 км, и для скорости света было получено значение 313 000 км/с.

Было разработано еще много других, более точных лабораторных методов измерения скорости света. В частности, американский физик А. Майкельсон разработал совершенный метод измерения скорости света с применением вместо зубчатого колеса вращающихся зеркал.

По современным данным, скорость света в вакууме равна 299 792 458 м/с. Ошибка в измерении скорости не превышает 0,3 м/с.

Задача 1.1. В опыте Физо по определению скорости света световой пучок проходил через узкую прорезь между зубцами вращающегося колеса, отражался от зеркала, расположенного на расстоянии $l = 8,6$ км от колеса, и возвращался, опять проходя между зубцами колеса. При какой минимальной частоте ν вращения колеса отраженный свет исчезал? Количество зубцов на колесе $N = 720$. Скорость света $c = 3,0 \cdot 10^8$ м/с.

$l = 8,6$ км $N = 720$ $c = 3,0 \cdot 10^8$ м/с <hr style="width: 100%;"/> $\nu = ?$	<p>Решение. Отраженный свет не виден наблюдателю, если за время $t = \frac{2l}{c}$ прохождения света до зеркала и обратно колесо повернется так, что на пути отраженного светового пучка окажется не прорезь, а зубец, т.е. если колесо повернется на ползубца.</p>
---	---

При повороте на один зубец угол поворота составит $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{N}$ (рад), а при повороте на ползубца $\frac{\Delta\varphi}{2} = \frac{2\pi}{2N} = \frac{\pi}{N}$ (рад).

Пусть угловая скорость вращения колеса равна ω , тогда за время $t = \frac{2l}{c}$ колесо должно повернуться на угол $\frac{\Delta\varphi}{2} = \omega t$. Тогда

$$\frac{\pi}{N} = \omega \frac{2l}{c} \Rightarrow \frac{\pi}{N} = (2\pi\nu) \frac{2l}{c}.$$

Из последнего равенства найдем ν :

$$\frac{1}{N} = \frac{4\nu l}{c} \Rightarrow \nu = \frac{c}{4Nl} = \frac{3,0 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{4 \cdot 720 \cdot 8,6 \cdot 10^3 \text{ м}} \approx 12 \text{ 1/с}.$$

Ответ: $\nu = \frac{c}{4Nl} \approx 12 \text{ 1/с}.$

СТОП! Решите самостоятельно: А1, В3, С1, С2.

Световой луч

Читатель: Если свет – это волна, то что же тогда следует понимать под световым лучом?

Автор: Да, свет – это волна, но длина этой волны по сравнению с размерами многих оптических приборов *очень мала*. Посмотрим,

как ведут себя волны на поверхности воды, когда размеры препятствий много больше длины волны.

Повторим опыт с волнами на воде, вызываемыми колебаниями ребра линейки LL , ударяющей по поверхности воды. Для того чтобы отыскать направление распространения волн, поставим на их пути преграду MM с отверстием, размеры которого значительно

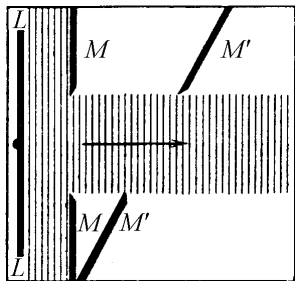


Рис. 1.3

больше, чем длина волны. Мы обнаружим, что за перегородкой волны распространяются в прямолинейном канале, проведенном через края отверстия (рис. 1.3). Направление этого канала и представляет собой направление распространения волны. Оно остается неизменным, если мы поставим перегородку *косо* ($M'M'$).

Направление, вдоль которого распространяются волны, всегда оказывается *перпендикулярным* к линии, все точки которой достигаются волновым возмущением в один и тот же момент. Линию эту называют волновым фронтом. Прямая, перпендикулярная к волновому фронту (стрелка на рис. 1.3) указывает направление распространения волны. Эту линию мы будем называть *лучом*. Итак, *луч есть геометрическая линия, проведенная перпендикулярно к волновому фронту и показывающая направление распространения волнового возмущения*. В каждой точке волнового фронта можно провести перпендикуляр к фронту, т. е. луч.

В рассмотренном нами случае фронт волны имеет вид прямой линии; поэтому лучи во всех точках фронта параллельны между собой. Если повторить опыт, взяв за источник волн колеблющийся

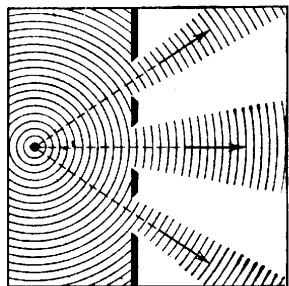


Рис. 1.4

конец проволоки, то фронт волны будет иметь форму окружности. Поставив на пути такой волны преграды с отверстиями, размеры которых велики по сравнению с длиной волны, получим картину, изображенную на рис. 1.4. Таким образом, и в этом случае направление распространения волны совпадает с прямыми линиями, перпендикулярными к фронту волны, т. е.

с направлением лучей; в данном случае лучи изображены радиусами, проведенными из точки, откуда исходят волны.

Наблюдения показывают, что в однородной среде свет также распространяется вдоль *прямых линий*.

Явления прямолинейного распространения света аналогичны опытам, показанным на рис. 1.3 и 1.4. Если мы сделаем «видимым» путь солнечного света, пустив в комнату дыма, то мы можем повторить опыт с перегородками. Поставим на пути света непрозрачный картон с одним или несколькими небольшими отверстиями, которые, конечно, во много раз превосходят длину световой волны; мы увидим путь света в комнате в виде узких каналов, опирающихся на края отверстий (рис. 1.5). При любом положении картона эти каналы имеют одно и то же направление: они указывают на Солнце.

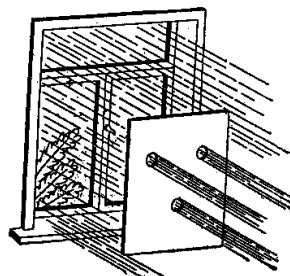


Рис. 1.5

Под световым лучом понимают не тонкий световой пучок, а линию, указывающую направление распространения световой энергии. Чтобы определить это направление, мы выделяем узкие световые пучки, диаметр которых все же должен превосходить длину волны. Затем мы заменяем эти пучки линиями, которые являются осями световых пучков (рис. 1.6). Эти линии и изображают световые лучи. Следовательно, говоря об отражении или преломлении световых лучей, мы имеем в виду изменение направления распространения света.

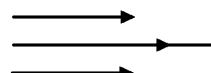


Рис. 1.6

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

Геометрической оптикой называется раздел оптики, в котором изучаются законы распространения света в прозрачных средах на основе представления о световом луче.

Одним из основных законов геометрической оптики является закон прямолинейного распространения света: **в однородной среде свет распространяется прямолинейно.**

Другими словами, в однородной среде световые лучи представляют собой прямые линии.

Источники света

Источники света можно разделить на самостоятельные и источники отраженного света.

Самостоятельные – это источники, которые испускают свет непосредственно: Солнце, звезды, всевозможные лампы, пламя и т.д.

Источники отраженного света лишь отражают свет, падающий на них от самостоятельных источников. Так, любой предмет в комнате, освещенной солнечными лучами: стол, книга, стены, шкаф, представляет собой источник отраженного света. Источниками отраженного света являемся и мы сами. Луна также является источником отраженного солнечного света.

Заметим также, что атмосфера является источником отраженного света, и именно благодаря атмосфере утром светает задолго до восхода Солнца.

Читатель: А почему солнечные лучи, которые освещают все предметы в комнате, сами по себе невидимы?

Автор: Человеческий глаз воспринимает только те лучи, которые непосредственно в него попадают. Поэтому если солнечный луч идет мимо глаза, то глаз его и не видит. Но вот если в воздухе много пыли или дыма, то солнечные лучи становятся видимыми: рассеиваясь на частицах пыли или дыма, часть солнечного света попадает нам в глаза, и тогда мы видим "ход" солнечного луча.

СТОП! Решите самостоятельно: А2–А4, В1, В2, С3, С4.

Вторым законом геометрической оптики является *закон независимости световых пучков*. Пересекаясь в пространстве, лучи *не оказывают никакого влияния друг на друга*.

Заметим, что таким же свойством обладают волны на поверхности воды: пересекаясь, они не влияют друг на друга.

СТОП! Решите самостоятельно: В4.

Тень и полутень

Прямолинейностью распространения света объясняется образование тени, т. е. области, куда не поступает световая энергия. При малых размерах источника (светящаяся точка) получается резко очерченная тень (рис. 1.7). Если бы свет распространялся не прямолинейно, он мог бы обогнуть препятствие, и тени не получилось бы.

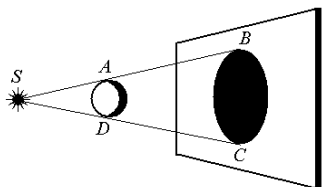


Рис. 1.7

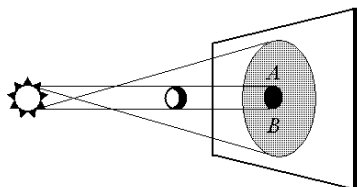


Рис. 1.8

При больших размерах источника создаются нерезкие тени (рис. 1.8). Дело в том, что от каждой точки источника свет распространяется прямолинейно и предмет, освещенный уже двумя светящимися точками, даст две несовпадающие тени, наложение которых образует тень неравномерной густоты. Полная тень при протяженном источнике образуется лишь в тех участках экрана, куда свет не попадает совсем. По краям полной тени располагается более светлая область – полутень. По мере удаления от области полной тени полутень становится все более и более светлой. Из области полной тени глаз совсем не увидит источника света, а из области полутени он увидит лишь часть его поверхности (рис. 1.9).

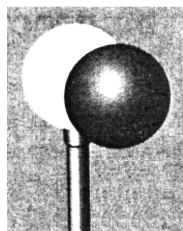


Рис. 1.9

Во многих случаях тень вообще не образуется. Так, в пасмурный день нельзя увидеть тени от столбов, домов и других предметов. При хирургических операциях операционное поле освещают особыми бестеневыми лампами.

Тени и полутени космических масштабов наблюдаются при солнечном и лунном затмениях. На рис. 1.10 изображена схема затмений Солнца и Луны. Когда Луна занимает положение 1, происходит солнечное затмение. Если она занимает положение 2, наблюдается лунное затмение.

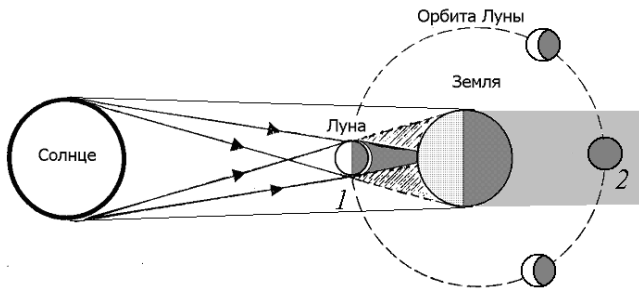


Рис. 1.10

Заметим, что если источник света представляет собой вертикальную нить, то размеры полутени будут тем меньше по сравнению с размерами тени, чем более вытянутым в вертикальном направлении является предмет, отбрасывающий тень (рис. 1.11, а, б), и чем ближе он расположен к экрану (1.11, в).

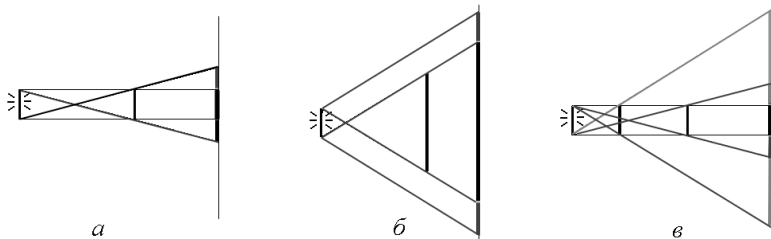


Рис. 1.11

СТОП! Решите самостоятельно: В5, В7–В9, С5, С6, С10.

Задача 1.2. Вертикальный столб отбрасывает тень длиной $l = 1,0$ м (рис. 1.12). Под каким углом к горизонту в этот момент находится Солнце, если высота столба $h = 2,0$ м?

$$\begin{array}{l|l} l = 1,0 \text{ м} & \\ h = 2,0 \text{ м} & \text{да} \\ \hline \alpha = ? & \end{array}$$

Решение. Как видно из рис. 1.12, $\operatorname{tg} \alpha = h/l$, отсюда

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{h}{l} = \operatorname{arctg} \frac{2,0 \text{ м}}{1,0 \text{ м}} \approx 63^\circ.$$

Ответ: $\alpha = \operatorname{arctg} \frac{h}{l} \approx 63^\circ.$

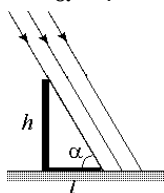


Рис. 1.12

СТОП! Решите самостоятельно: В6, С8, С9, D1.

Задача 1.3. Диаметр источника света $D = 20$ см, расстояние его до экрана $L = 2,0$ м. На каком наименьшем расстоянии от экрана надо поместить мячик диаметром $d = 8,0$ см, чтобы он совершенно не отбрасывал тени на экран, а давал только полутень? Прямая, проходящая через центры источника света и мячика, перпендикулярна плоскости экрана (рис. 1.13).

$D = 20$ см
$L = 2,0$ м
$d = 8,0$ см
$l = ?$

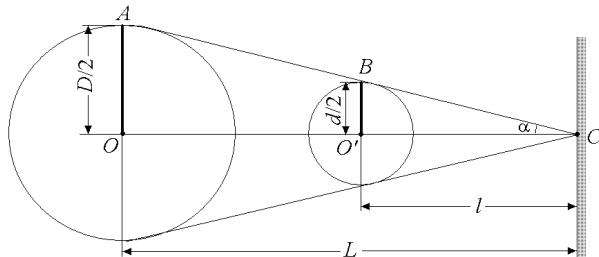


Рис. 1.13

Решение. В данной ситуации размер тени вырождается в одну точку – точку C (рис. 1.13). Величину l легко найти из подобия треугольников:

$$\begin{aligned} \Delta AOC \sim \Delta BO'C &\Rightarrow \frac{L}{D/2} = \frac{l}{d/2} \Rightarrow l = \frac{d}{D} L = \\ &= \frac{8,0 \text{ см}}{20 \text{ см}} \cdot 2,0 \text{ м} \approx 0,80 \text{ м}. \end{aligned}$$

Ответ: $l = \frac{d}{D} L \approx 0,80$ м.

СТОП! Решите самостоятельно: С11, С12.

Самый простой фотоаппарат – ящик с дыркой (камера-обскура)

Чтобы сделать фотографию, совершенно необязательно иметь современный цифровой фотоаппарат. Вполне достаточно иметь картонный ящик с маленьким отверстием (диаметром около 0,5 мм) и фотопластинку, которую надо закрепить на задней стенке ящика.

Если поместить перед таким ящиком ярко освещенный предмет, то на задней стенке (там, где находится фотопластинка) мы получим перевернутое изображение предмета (рис. 1.14).

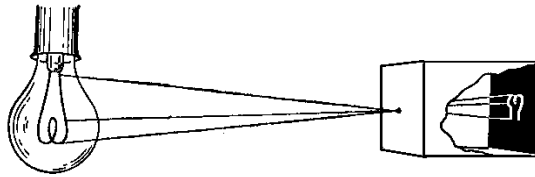


Рис. 1.14

Этот результат нетрудно понять. Действительно, от каждой точки источника через отверстие проходит узкий световой пучок, который дает на экране небольшое пятнышко, воспроизводящее форму отверстия. Свет от всего источника в целом дает на экране картину, нарисованную такими светлыми пятнышками, накладывающимися друг на друга. Если размер отверстия таков, что отдельные пятнышки превосходят детали картины, то она получится размытой, плохо передающей объект. Но при достаточно малых размерах отверстия размеры пятнышек будут меньше деталей картины, и изображение получится вполне удовлетворительное.

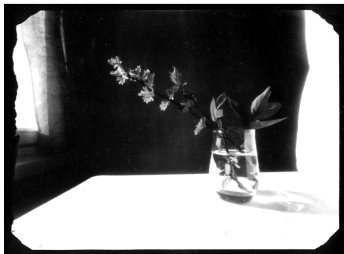


Рис. 1.15

Рис. 1.15 воспроизводит фотографию, полученную с помощью такой дырочной фотокамеры.

Попробуем ответить на два вопроса:

1) каковы размеры изображения точечного источника света в камере-обскуре?

2) на каком расстоянии друг от друга находятся изображения двух различных точечных источников света в камере-обскуре.

На рис. 1.16 показано изображение точки S . Ее изображением является светлое пятно диаметром d' . Найдем величину d' , если диаметр «дырки» d , глубина камеры x , а расстояние от источника до дырки l .

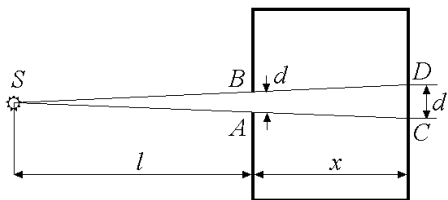


Рис. 1.16

Из подобия $\triangle SAB$ и $\triangle SDC$ получим

$$\frac{d'}{d} = \frac{l+x}{l} \Rightarrow d' = d \frac{l+x}{l}.$$

То есть размер изображения прямо пропорционален размеру дырки. Ясно, что чем меньше будет d' , тем более резким будет изображение. Но! Если величина d' будет сравнима с длиной волны ~ 1 мкм, то уже заметную роль будут играть волновые свойства света, будет происходить *дифракция* – огибание препятствия – и качество изображения будет ухудшаться.

Теперь попробуем найти расстояние между изображениями двух точечных источников S_1 и S_2 (рис. 1.17).

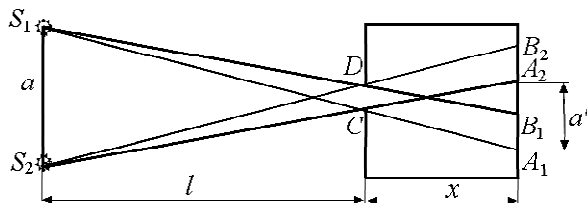


Рис. 1.17

Если расстояние между источниками равно a , то расстояние между изображениями (крайними нижними точками изображений) равно a' . Рассмотрим подобные треугольники S_1CS_2 и A_1CA_2 , тогда из подобия следует

$$\frac{a'}{a} = \frac{x}{l} \Rightarrow a' = a \frac{x}{l}.$$

Как видим, величина «разрешения», т.е. расстояния от различных точек изображения тем больше, чем больше *глубина* камеры x .

СТОП! Решите самостоятельно: С13, D2, D3.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Задачи легкие

A1. Сколько времени свет идет до Земли от Солнца и от Луны, если они удалены от Земли на расстояние $1,5 \cdot 10^8$ и $3,8 \cdot 10^5$ км соответственно?

A2. Луч прожектора хорошо виден в тумане и хуже – в ясную погоду. Почему?

A3. Чем объяснить видимость световых пучков, проникающих в солнечный день в окно полутемного помещения? Нельзя ли что-нибудь предпринять, чтобы это явление прекратилось?

A4. Почему светать начинает раньше, чем взойдет Солнце?

Задачи средней трудности

В1. Почему днем из комнаты через открытое окно видно все, что происходит на улице, а с улицы трудно разобрать, что находится в комнате?

В2. Почему на горизонте звёзды менее яркие?

В3. В историческом опыте Физо по определению скорости света расстояние между колесом, имеющим $N = 720$ зубцов, и зеркалом было $l = 8633$ м. Свет исчез в первый раз при частоте вращения зубчатого колеса $\nu = 12,67 \text{ с}^{-1}$. Какое значение скорости света получил Физо?

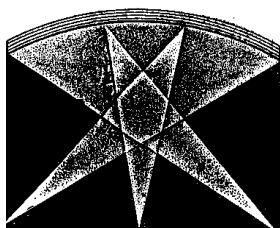


Рис. 1.18

В4. Изображение на экране панорамного кинотеатра создается пересекающимися световыми пучками, направленными от трех проекторов (рис. 1.18). Не сказывается ли пересечение пучков на качестве изображения?

В5. Тени от телеграфных столбов утром и вечером удлиняются. Меняется ли в течение дня длина тени от проводов?

В6. Длина тени от останкинской телевизионной башни, освещенной солнцем, в некоторый момент времени оказалась равной 600 м; длина тени от человека высотой 1,75 м в тот же момент времени была равна 2 м. Какова высота башни?

В7. Во время хирургических операций тень от рук хирурга закрывает операционное поле. Как устранить такое неудобство?

В8. Почему тень ног от фонаря на земле резко очерчена, а тень головы более расплывчата? При каких условиях тень всюду будет одинаково отчетлива?

В9. Как нужно держать карандаш над столом, чтобы получить резко очерченную тень, если источником света служит закрепленная у потолка лампа дневного света, имеющая форму длинной трубки?

Задачи трудные

С1. В 1875 г. метод Физо был использован французским физиком Корню, который, значительно увеличив частоту вращения колеса, зарегистрировал 28 последовательных исчезновений и появлений света. Какое значение скорости света получил Корню, если расстояние от колеса до зеркала было 23 000 м, число зубцов 200, а 28-е появление света наблюдалось при частоте вращения колеса $914,3 \text{ с}^{-1}$?

С2. Схема опыта Майкельсона по определению скорости света изображена на рис. 1.19. Расстояние $AB = l = 35,5$ км. С какой частотой ν

должна вращаться восьмигранная зеркальная призма K , чтобы источник света S был виден в трубу T ? Расстояние OB мало по сравнению с расстоянием AB .

С3. Если чертеж покрыть матовым стеклом, приложив стекло матовой стороной к чертежу, то линии чертежа видны хорошо. Если же приложить стекло матовой стороной вверх, то чертеж не виден или виден очень нечетко. Почему?

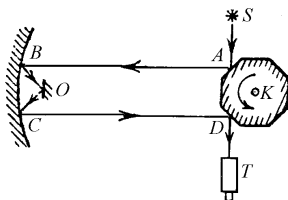


Рис. 1.19

С4. Как рассказывают альпинисты, высоко в горах сумерки заметно короче, чем на равнине. Как вы думаете, с чем это связано?

С5. Почему тени, даже при точечном источнике света, никогда не бывают вполне темными?

С6. Что увидит космонавт, находясь на Луне, в то время как на Земле будет наблюдаться полное лунное затмение?

С7. Окно имеет форму прямоугольника шириной 1,2 м и высотой 2 м. Какими геометрическими фигурами может быть часть пола, освещенная солнечными лучами? При каких условиях освещенная часть пола будет квадратом? Считать солнечные лучи параллельными.

С8. Теплоход проходит мимо стоящей на якоре шхуны. В момент наибольшего сближения боцман шхуны вытягивает руку вперед и, глядя только правым глазом, заслоняет большим пальцем вытянутой руки нос теплохода. Открыв левый глаз и закрыв правый, он видит, что теперь его палец закрывает корму теплохода. Боцман мгновенно и довольно точно называет расстояние L до теплохода. Попробуйте и вы это сделать, если известно, что длина теплохода $a = 100$ м, длина вытянутой руки боцмана $l = 60$ см, расстояние между зрачками $b = 65$ мм.

С9. Вертикальный колышек высотой $h = 1,0$ м, поставленный вблизи уличного фонаря, отбрасывает тень длиной $l_1 = 0,80$ м. Если перенести колышек на $d = 1,0$ м дальше от фонаря (в той же плоскости), то он отбрасывает тень длиной $l_2 = 1,25$ м. На какой высоте H подвешен фонарь?

С10. Вилка освещается пламенем свечи и дает тень на стене. При вертикальном положении вилки тень отчетливо воспроизводит форму ее зубцов, а при горизонтальном положении вилки тень размыта и зубцов не видно (рис. 1.20). Почему?

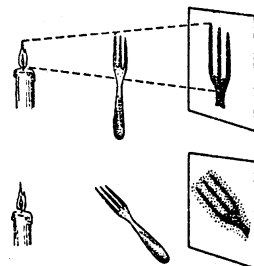


Рис. 1.20

С11. Электрическая лампа помещена в матовый стеклянный шар радиусом 20 см и подвешена на высоте 5,0 м над полом. Под лампой на высоте

1,0 м держат мяч радиусом 10 см. Определить размеры тени и полутени, даваемых мячом. На какой высоте следует поместить мяч, чтобы тень на полу исчезла? Каковы при этом будут размеры полутени? Каков должен быть диаметр мяча, чтобы размеры его тени были одинаковы при любых расстояниях мяча от пола?

С12. Оцените размер области поверхности Земли, где одновременно наблюдается солнечное затмение (полное или частичное). Радиус Солнца $r_C = 7 \cdot 10^5$ км, радиус Луны $r_L = 1700$ км; расстояние от Земли до Солнца $R_C = 1,5 \cdot 10^8$ км, от Земли до Луны $R_L = 3,8 \cdot 10^5$ км.

С13. Изображение предмета получают с помощью камеры с маленьким отверстием (рис. 1.21). Глубина камеры $EC = 20$ см, расстояние до предмета $CD = 20$ см, диаметр отверстия $d = 1$ мм. Определить, можно ли при таких условиях различить на изображении детали предмета, величина которых равна 2 мм.

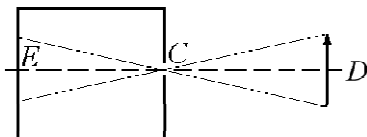


Рис. 1.21

Задачи очень трудные

D1. Солнечные лучи, проходя сквозь маленькие отверстия в листе дерева, дают на земле светлые пятна в форме эллипсов одинаковой формы, но разных размеров. Большая ось самых крупных эллипсов $a = 16$ см, а малая ось $b = 12$ см. Какова высота H дерева? Под каким углом α к горизонту падают солнечные лучи? Угловой размер солнечного диска $\beta = 9,3 \cdot 10^{-3}$ рад.

D2. Фотографировать тигра с расстояния L менее 20 метров опасно. Какой размер может иметь камера-обскура с отверстием диаметром $d = 1$ мм, чтобы тигр на фотографии получился полосатым? Расстояние между полосами на шкуре тигра $l = 20$ см.

D3. В ясный безоблачный вечер лучи заходящего Солнца попадают в затемненную комнату через узкую горизонтальную щель в ставне. Длина щели $a = 6$ см, расстояние от окна до противоположной стены $l = 3$ м. Какова форма светового пятна на стене, если солнечные лучи падают на нее под прямым углом? Оцените размеры светового пятна. Что произойдет с пятном, если уменьшать ширину щели? Длину?

§ 2. Закон отражения света. Плоское зеркало

Что происходит с лучом света, который падает на поверхность прозрачного тела (например, стекла)?

Тут возможны три варианта развития событий:

- 1) луч может *отразиться* от поверхности;
- 2) луч может *пройти насквозь*;
- 3) луч может *поглотиться* внутри прозрачного тела.

Какая же из этих трех возможностей реализуется? Обычно реализуются *все три возможности сразу*: т.е. часть световой энергии отражается, часть проходит насквозь, а часть поглощается.

Что такое угол падения?

Пусть имеется некоторая отражающая поверхность MN , на которую падает луч I (рис. 2.1). Восстановим из точки O , в которой луч I "входит" в поверхность, перпендикуляр OO' к поверхности MN : $OO' \perp MN$. Тогда угол α между лучом I и перпендикуляром OO' называется *углом падения* луча I на отражающую поверхность MN .

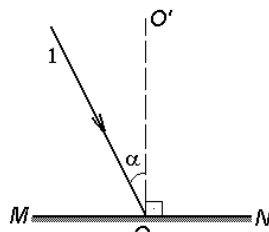


Рис. 2.1

Задача 2.1. На стеклянную пластинку (рис. 2.2) падает световой луч. В каком случае угол падения наибольший? наименьший?

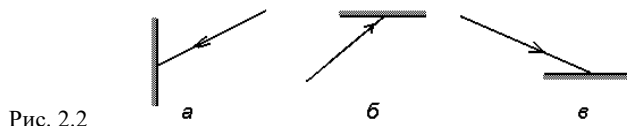


Рис. 2.2

Решение. Восстановим перпендикуляры к отражающим поверхностям в точках падения лучей (рис. 2.3). Как легко видеть в случае $в$ угол падения наибольший, а в случае $а$ – наименьший.

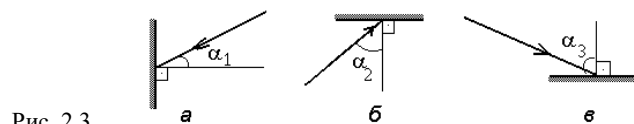


Рис. 2.3

Что такое угол отражения?

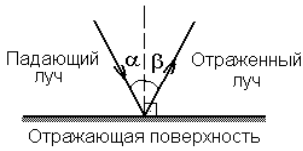


Рис. 2.4

Угол отражения – это угол, который составляет отраженный луч с перпендикуляром, восстановленным к отражающей поверхности из точки падения луча на отражающую поверхность. На рис. 2.4 α – угол падения, а β – угол отражения.

Закон отражения света

Падающий луч, отраженный луч и перпендикуляр, восстановленный к отражающей поверхности из точки падения луча, лежат в одной плоскости, причем угол падения равен углу отражения:

$$\alpha = \beta. \quad (2.1)$$

Отметим, что для того, чтобы однозначно определить положение отраженного луча, недостаточно просто сказать, что угол падения равен углу отражения. Ведь, вообще говоря, падающий луч, отраженный луч и перпендикуляр, восстановленный к отражающей

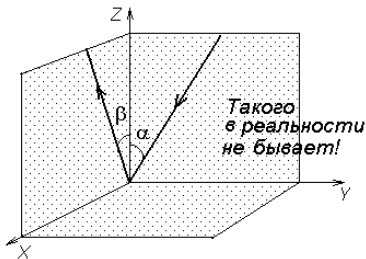
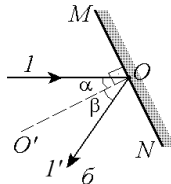
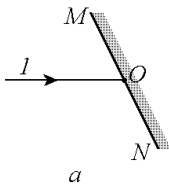


Рис. 2.5

поверхности из точки падения луча, могут и не лежать в одной плоскости. Например, на рис. 2.5 показана гипотетическая ситуация, когда падающий луч составляет угол α с осью OZ и лежит в плоскости ZOY , а отраженный луч составляет угол β с осью OZ и лежит в плоскости ZOX . При этом угол падения равен

углу отражения: $\alpha = \beta$. Однако экспериментально установлено, что так, как показано на рис. 2.5, в реальности не бывает.



Задача 2.2. На рис. 2.6, *a* изображен луч I , падающий на отражающую поверхность MN . Постройте отраженный луч.

Рис. 2.6

Решение.

1. Проведем перпендикуляр к отражающей поверхности: $OO' \perp MN$. Падающий луч образует с перпендикуляром OO' некоторый угол α .

2. Проведем луч I' из точки O так, чтобы он составлял с перпендикуляром OO' угол $\beta = \alpha$ (см. рис 2.6, б).

СТОП! Решите самостоятельно: А1–А3, В1–В3, С1.

Задача 2.3. Под каким углом должен падать луч на плоское зеркало, чтобы отраженный луч был перпендикулярен падающему?

$$\begin{array}{l} \gamma = 90^\circ \\ \alpha = ? \end{array}$$

Решение. Если угол между падающим и отраженным лучами равен 90° (рис. 2.7), то $\alpha + \beta = \gamma = 90^\circ$, где α – угол падения, а β – угол отражения. Поскольку согласно закону отражения света

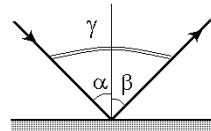


Рис. 2.7

$$\alpha = \beta \Rightarrow \alpha + \alpha = \gamma \Rightarrow 2\alpha = \gamma \Rightarrow \alpha = \gamma/2 = 45^\circ.$$

Ответ: угол падения $\alpha = 45^\circ$.

СТОП! Решите самостоятельно: А4–А6, В4.

Как при повороте зеркала повернется отраженный луч?

Задача 2.4. Плоское зеркало AB может вращаться вокруг горизонтальной оси O . Луч света падает на зеркало под углом α . На какой угол повернется отраженный луч, если зеркало повернется на угол β (рис. 2.8, а)?

$$\begin{array}{l} \alpha \\ \beta \\ \gamma = ? \end{array}$$

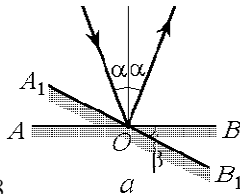
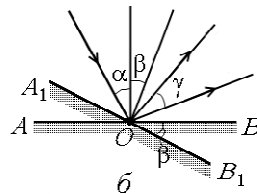


Рис. 2.8



Решение. При повороте зеркала на угол β нормаль к зеркалу также повернется на угол β , поэтому угол падения после поворота зеркала $\alpha + \beta$, а угол между падающим и отраженным лучами $2(\alpha + \beta)$. До поворота же зеркала угол между падающим и отра-

женным лучами был 2α . Следовательно, отраженный луч повернется на угол $\gamma = 2(\alpha + \beta) - 2\alpha = 2\beta$ (рис. 2.8, б).

Ответ: $\gamma = 2\beta$.

Итак, запомним: при повороте зеркала на произвольный угол β отраженный луч поворачивается на угол, в два раза больший:

$$\gamma = 2\beta. \quad (2.2)$$

СТОП! Решите самостоятельно: В5, В6, С2.

Как расположить зеркало?

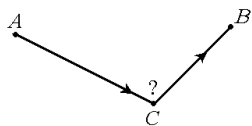
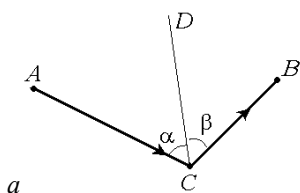


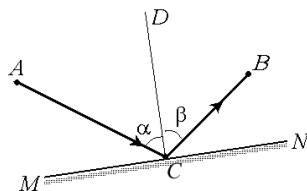
Рис. 2.9

Пусть из точки A выходит световой луч (рис. 2.9). Нам нужно, чтобы, отразившись в точке C от зеркала, он попал в точку B . Как должно быть расположено зеркало, чтобы отраженный луч попал в точку B ?

Читатель: Если в точке C происходит *отражение*, значит, угол ACB – это угол падения α плюс угол отражения β : $\angle ACB = \alpha + \beta$, причем $\alpha = \beta$. Построим биссектрису $\angle ACB$ – луч CD (рис. 2.10, а). Эта биссектриса является перпендикуляром к поверхности зеркала, восстановленным из точки падения луча на зеркало. Теперь осталось только провести отрезок $MN \perp CD$ – это и есть искомое положение зеркала (рис. 2.10, б).



а



б

Рис. 2.10

Автор: Совершенно верно.

СТОП! Решите самостоятельно: В7.

Задача 2.5. Человек, идущий по шоссе, увидел в защитном стекле встречного автомобиля Солнце. Под каким углом к горизонту наклонено стекло, если угловая высота Солнца над горизонтом $\beta = 18^\circ$, а попадающий в глаз человека отраженный луч направлен

горизонтально? Солнце, автомобиль и человек расположены в вертикальной плоскости (рис. 2.11).

$\beta = 18^\circ$
 $\alpha = ?$ | **Решение.** Если OD – нормаль к поверхности стекла, то угол между отраженным лучом и плоскостью стекла

$$\angle BOC = 90^\circ - \beta/2. \quad (1)$$

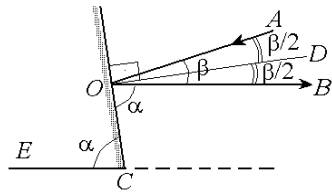


Рис. 2.11

Пусть EC – горизонтальная линия, OB – отраженный луч. Тогда по условию задачи $OB \parallel EC$. Тогда $\angle BOC = \angle OCE = \alpha$ – как внутренние накрест лежащие углы при параллельных прямых OB и EC . Отсюда с учетом (1) получим

$$\alpha = 90^\circ - \frac{\beta}{2} = 90^\circ - \frac{18^\circ}{2} = 81^\circ.$$

Ответ: $\alpha = 81^\circ$.

СТОП! Решите самостоятельно: В8, С3.

Задача 2.6. Узкий луч света, проходя через маленькое отверстие в экране (перпендикулярно к поверхности экрана), попадает на вращающееся шестигранное зеркало, ось вращения которого параллельна поверхности экрана и находится напротив отверстия. Какой длины L будет прочерчивать полоску на экране отраженный от зеркала луч, если расстояние между зеркалом и экраном $l = 1,0$ м? Разрамами граней зеркала по сравнению с расстоянием l пренебречь.

$l = 1,0$ м
 $L = ?$ | **Решение.** В случае, когда грань AB параллельна экрану (рис. 2.12, а), отраженный луч совпадает с падающим.

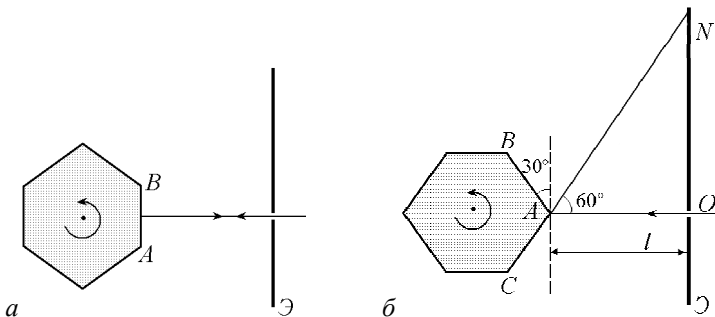


Рис. 2.12

Наибольшее отклонение отраженного луча от грани AB получается тогда, когда зеркало обращено ребром к отверстию (рис. 2.12, б). (При дальнейшем повороте зеркала падающий луч вообще не попадает на грань AB .)

Поскольку при повороте зеркала на угол $\beta = 30^\circ$, отраженный луч поворачивается на угол $2\beta = 60^\circ$ (см. формулу (2.2)), то угол NAO , который составляет отраженный луч AN с гранью AB , равен 60° . Тогда длина полоски, которую «прочерчивает» отраженный от

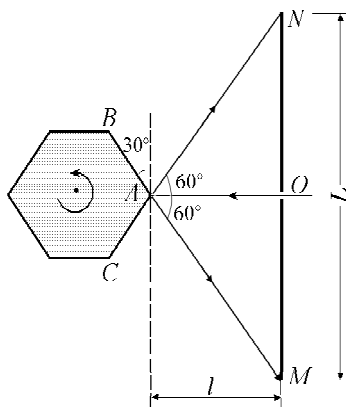


Рис. 2.13

зеркала луч над точкой O , – это катет ON прямоугольного треугольника AON :

$$ON = OA \cdot \operatorname{tg} 60^\circ = l \operatorname{tg} 60^\circ.$$

Полоску такой же длины в силу симметрии будет «прочерчивать» луч под точкой O (рис. 2.13). Поэтому общая длина L полоски, которую будет прочерчивать отраженный луч, равна

$$L = ON + OM = 2l \operatorname{tg} 60^\circ = 2 \cdot (1,0 \text{ м}) \cdot \operatorname{tg} 60^\circ \approx 3,5 \text{ м}.$$

$$\text{Ответ: } L = 2l \operatorname{tg} 60^\circ \approx 3,5 \text{ м}.$$

СТОП! Решите самостоятельно: В9, С4, С5.

Изображение в плоском зеркале: что это такое?

Плоское зеркало – это гладкая отражающая поверхность, имеющая форму плоскости.

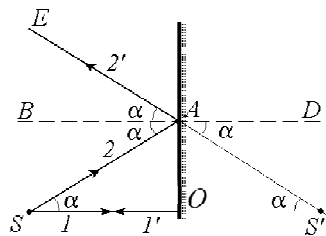


Рис. 2.14

Пусть рядом с плоским зеркалом находится точечный источник света S (рис. 2.14). Попробуем выяснить, как "ведут себя" отраженные от зеркала световые лучи.

1. Рассмотрим ход луча I , падающего на зеркало перпендикулярно к его

поверхности. Угол падения этого луча $\alpha = 0^\circ$, следовательно, и угол отражения $\beta = 0^\circ$, то есть отраженный луч l' совпадает с падающим лучом 1. (Пунктиром обозначено продолжение луча l' за плоскость зеркала).

2. Рассмотрим луч 2, падающий на зеркало под некоторым произвольным углом α . Если BA – перпендикуляр к поверхности зеркала, то отраженный луч $2'$ составляет с перпендикуляром BA угол α (по закону отражения света).

3. Продолжим пунктиром отраженный луч $2'$ за плоскость зеркала до пересечения с продолжением отраженного луча $1'$ в точке S' .

4. Попробуем выяснить, что больше: расстояние SO от точечного источника S до плоскости зеркала или $S'O$ – расстояние от точки пересечения продолжений отраженных лучей $1'$ и $2'$ до плоскости зеркала.

Заметим, что $\angle EAB = \angle DAS' = \alpha$ (как вертикальные), $\angle ASO = \angle BAS = \alpha$ и $\angle DAS' = \angle OS'A = \alpha$ (как внутренние накрест лежащие углы при параллельных прямых BD и SS').

Теперь рассмотрим два треугольника: $\triangle SAO$ и $\triangle S'AO$. Они прямоугольные, имеющие общую сторону AO и равные острые углы ($\angle ASO = \angle OS'A = \alpha$), следовательно, они равны (по катету и острому углу: $\triangle SAO = \triangle S'AO$). Отсюда следует:

$$SO = S'O.$$

А это значит, что точки S и S' симметричны относительно прямой AO : они лежат на перпендикуляре к прямой AO по разные стороны и на равных расстояниях от нее. Получается, что все лучи, исходящие из точечного источника S и попавшие на зеркало AO отражаются от него так, что продолжения отраженных лучей пересекаются за плоскостью зеркала в одной точке S' , симметричной точке S .

Читатель: Подождите! Почему Вы говорите, что в точке S' пересекаются продолжения *всех* отраженных от зеркала лучей? Мы ведь рассмотрели только два таких луча: 1 и 2.

Автор: Да, но луч 2 падал на зеркало под совершенно произвольным углом α , и наше доказательство того факта, что $SO = S'O$ НИКАК НЕ ЗАВИСЕЛО от величины этого угла. А следовательно, и любой другой луч, исходящий из точки S , отразится от

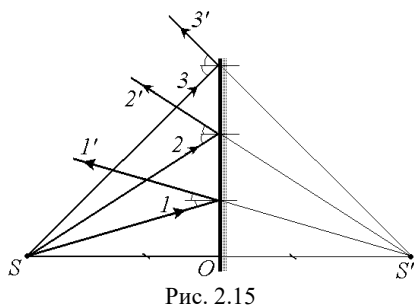


Рис. 2.15

зеркала так, что и его продолжение пройдет через точку S' . А это значит, что продолжения всех лучей, исходящих из источника S и отраженных от зеркала, пересекутся в одной единственной точке S' (рис. 2.15).

Что это такое – точка пересечения продолжений отраженных от зеркала лучей?

Если вы посмотрите в зеркало, перед которым стоит зажженная свеча, то увидите, что *за зеркалом* стоит такая же зажженная свеча (рис. 2.16). Хотя не представляет труда убедиться, что никакой свечи за зеркалом нет. Выходит, мы *видим* то, чего *на самом деле нет!* Почему же так происходит?

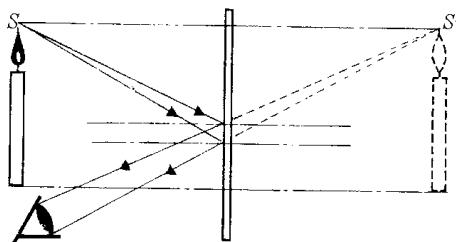


Рис. 2.16

Предположим, что в точке S' на самом деле находится источник света. Тогда в глаз человека попадет точно такой же расходящийся пучок лучей, какой получается при отражении от зеркала лучей, исходящих из точки S . Поэтому человеческий глаз воспринимает отраженный от зеркала расходящийся пучок лучей так, как если бы они исходили из точки S' , и в нашем сознании возникает зрительный образ *несуществующего* предмета, находящегося в точке S' .

Точку пересечения продолжений расходящихся лучей после отражения от зеркала называют *мнимым изображением*.

В плоском зеркале мнимое изображение симметрично источнику относительно плоскости зеркала.

Задача 2.8. Постройте изображение точечного источника S в плоском зеркале (рис. 2.17, а).

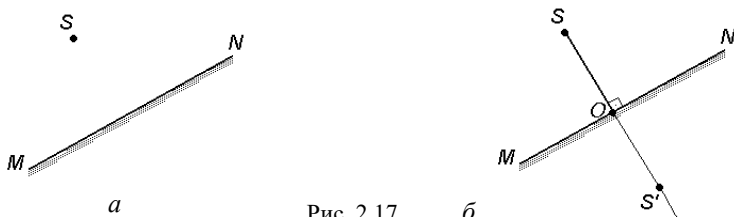


Рис. 2.17 б

Решение. Опустим перпендикуляр из точки S на плоскость зеркала MN (рис. 2.17, б). Отложим на этом перпендикуляре расстояние $OS' = OS$. Тогда точка S' будет мнимым изображением точки S .

Задача 2.9. Постройте в плоском зеркале MN изображение отрезка AB (рис. 2.18, а).

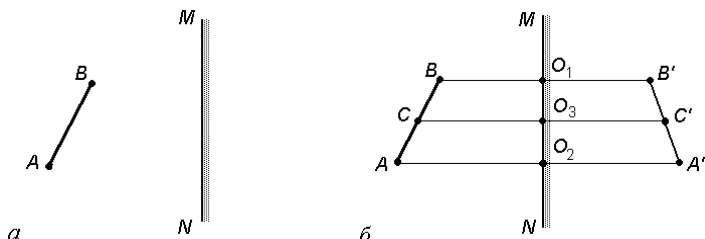


Рис. 2.18

Решение. Отрезок AB можно рассматривать как множество точечных источников, лежащих на этом отрезке. Поэтому построить изображение предмета – означает построить изображение всех точек, составляющих предмет.

1. Построим изображения точек A и B . Проведем перпендикуляры $BO_1 \perp MN$ и $AO_2 \perp MN$ и отложим на продолжениях этих перпендикуляров отрезки $B'O_1 = BO_1$ и $A'O_2 = AO_2$ (рис. 2.18, б). Тогда точки A' и B' будут мнимыми изображениями точек A и B .

2. Возникает вопрос: как же построить изображения всех остальных точек отрезка AB ? Ведь их бесконечно много!

Рассмотрим произвольную точку $C \in AB$. Ее изображение – точка C' : $O_3C = O_3C'$, где $CC' \perp MN$ (см. рис. 2.18, б). Если перегнуть лист бумаги по линии MN , то точка C совпадет с точкой C' . А поскольку точку C мы взяли совершенно произвольно, то и всякая другая точка отрезка AB при перегибании листа по линии MN совпадет со своим изображением. Значит, изображением отрезка AB является отрезок $A'B'$.

Заметим, что, как видно из рис. 2.18, размер мнимого изображения в плоском зеркале (длина отрезка $A'B'$) в точности равен размеру источника (длина отрезка AB).

СТОП! Решите самостоятельно: А7, А8, В10, С6.

«Право» и «лево» меняются местами

Автор: Как Вы считаете, кого мы видим, когда смотримся в зеркало?

Читатель: Когда я смотрюсь в зеркало, я вижу самого себя. Ну, точнее сказать, свое мнимое изображение, которое ничем от меня не отличается.

Автор: Вы уверены?

Читатель: Конечно.

Автор: Значит, если сфотографировать Ваше изображение в зеркале, а затем сфотографировать непосредственно Вас и потом положить рядом полученные две фотографии, между ними не будет абсолютно никаких различий?

Читатель: Конечно. Ну, разве что фотография зеркала будет чуть более тусклой, так как часть световой энергии все-таки поглощается стеклом.

Автор: На самом деле отличия есть, но если смотреть не очень внимательно, то их действительно можно не заметить. Для того чтобы было более понятно, о чем я говорю, попробуйте рассмотреть в зеркало обложку Вашего учебника по физике. Вместо слова ФИЗИКА Вы увидите непонятное слово АЖНЕНФ, написанное к тому же на неизвестном Вам языке, в котором наряду с русскими буквами А и Ф присутствуют явно не рус-

ские буквы: Ж, П, Е ! Раз зеркало так безжалостно исказило физику, значит, и Ваше изображение, по идее, должно бы чем-то отличаться от оригинала, не правда ли?

Давайте разберемся. На рис. 2.19,а показано построение изображения в плоском зеркале буквы Г, написанной на прозрачном листе бумаги. Если мы посмотрим на зеркало, то увидим, что верхняя горизонтальная палочка у буквы Г повернута влево, а не вправо, как у оригинала (рис. 2.19, б).

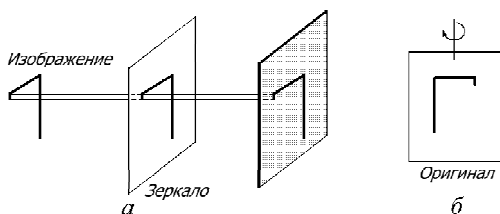


Рис. 2.19

Иными словами, на изображении в плоском зеркале "лево" и "право" как бы меняются местами. Поэтому и у Вашего изображения левая рука станет правой, а правая левой, да и сердце у Вашего изображения будет биться с правой стороны.

СТОП! Решите самостоятельно: А9.

Расстояние от источника до изображения

Задача 2.10. Человек стоит на расстоянии 5 м от вертикально расположенного плоского зеркала. На каком расстоянии от себя он видит свое изображение? Какое это изображение? Как изменится расстояние до изображения, если зеркало отодвинуть от человека на 2 м?

$$\begin{array}{l}
 l_1 = 5 \text{ м} \\
 \Delta l = 2 \text{ м} \\
 \hline
 x_1 = ? \\
 x_2 = ?
 \end{array}$$

Решение. Мы уже выяснили, что зеркало дает *мнимое* изображение источника света, причем источник и его изображение симметричны друг другу относительно плоскости зеркала. Поэтому расстояние между источником и изображением равно удвоенному расстоянию от источника до плоскости зеркала:

$$x_1 = 2l_1 = 2 \cdot 5 = 10 \text{ м,}$$

$$x_2 = 2(l_1 + \Delta l) = 2 \cdot (5 + 2) = 14 \text{ м.}$$

Ответ: $x_1 = 10 \text{ м}$, $x_2 = 14 \text{ м}$.

СТОП! Решите самостоятельно: А10–А11, А15, В11.

С какой скоростью движется изображение?

Задача 2.11. Человек идет к плоскому зеркалу равномерно со скоростью $v = 2 \text{ м/с}$. С какой скоростью приближается к зеркалу его изображение? Какова скорость сближения человека со своим изображением?

$$\begin{array}{|l} v = 2 \text{ м/с} \\ \hline v_{\text{из}} = ? \\ v_{\text{сб}} = ? \end{array}$$

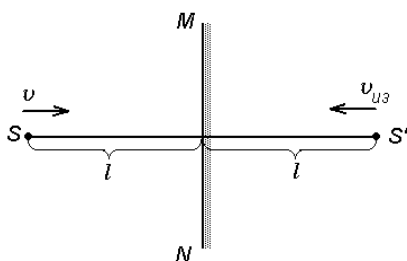


Рис. 2.20

Решение. Пусть человек (точка S на рис. 2.20) в начальный момент находился на расстоянии l от зеркала. Тогда и его изображение находилось на расстоянии l от зеркала, но с другой стороны.

Если человек пройдет расстояние l за время τ , то $v = \frac{l}{\tau} = 2 \text{ м/с}$.

Изображение человека за это же время τ тоже пройдет расстояние l , следовательно, скорость изображения

$$v_{\text{из}} = \frac{l}{\tau} = 2 \text{ м/с.}$$

Так как человек и его изображение движутся навстречу друг другу, скорость их сближения равна сумме скоростей человека и изображения:

$$v_{\text{сб}} = v + v_{\text{из}} = v + v = 2v = 2 \cdot (2 \text{ м/с}) = 4 \text{ м/с.}$$

Ответ: $v_{\text{из}} = v = 2 \text{ м/с}$; $v_{\text{сб}} = 2v = 4 \text{ м/с}$.

СТОП! Решите самостоятельно: В12, С7.

На какой угол повернется изображение?

Задача 2.12. В начальный момент времени луч AO перпендикулярен плоскости зеркала MN (рис. 2.21, *a*). Затем зеркало повернулось около точки O на угол α . На какой угол повернулось изображение луча OA ?

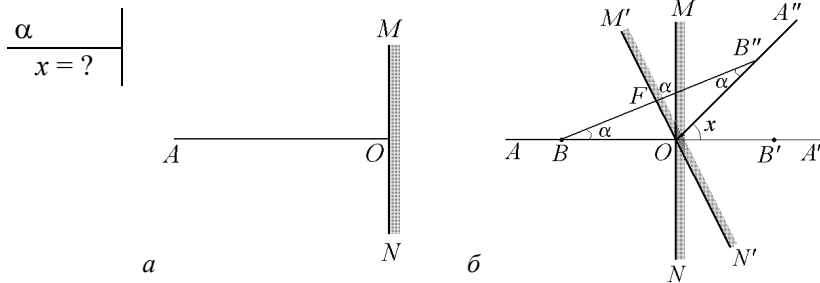


Рис. 2.21

Решение. В начальный момент изображением луча AO является луч OA' (рис. 2.21, *б*), а после поворота зеркала – луч OA'' .

Возьмем на луче OA произвольную точку B . Ее изображением до поворота зеркала будет точка B' , а после поворота – B'' , причем $BO = B'O = B''O$.

Рассмотрим $\triangle BOB''$: $\angle BB''O = \angle M'OM = \angle \alpha$ как углы со взаимно перпендикулярными сторонами ($BB'' \perp M'N'$, $BO \perp MN$). Поскольку $\triangle BOB''$ равнобедренный, то $\angle BB''O = \angle B''BO = \alpha$. Искомый угол x – это внешний угол $\triangle BOB''$, равный сумме внутренних углов, не смежных с ним: $x = \angle BB''O + \angle B''BO = \alpha + \alpha = 2\alpha$.

Итак, при повороте зеркала на угол α изображение луча поворачивается на угол в два раза больший.

Ответ: $x = 2\alpha$.

СТОП! Решите самостоятельно: В13, В14, С8.

Почему «убегает» Солнце?

Автор: Если в солнечный день плыть на лодке по озеру или реке и внимательно следить за отражением Солнца в воде, то можно за-

метить, что если лодка плывет «навстречу» Солнцу, то отражение Солнца в воде как бы «убегает» от нее. Сколько ни гребки, к отражению не приблизишься. А если лодка движется «от Солнца», то его отражение, наоборот, движется за лодкой. В чем тут дело?

Читатель: Честно говоря, не очень понимаю. Ведь отражение Солнца должно двигаться *вместе с Солнцем*, а на движение лодки оно никак не должно реагировать.

Автор: Вы правы, но речь идет не о реальном движении изображения Солнца на воде, а о кажущемся движении. Дело в том, что Солнце находится так далеко от нас, что его лучи, отраженные от воды, практически параллельны друг другу.

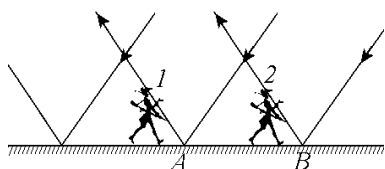


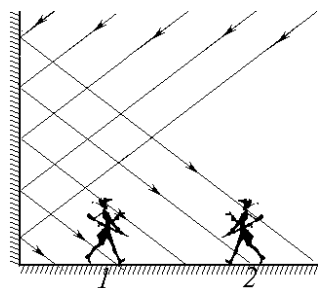
Рис. 2.23

На рис. 2.23 человек, находящийся в точке 1, воспринимает лучи, отраженные в точке А, а когда человек находится в точке 2, то воспринимает лучи, отраженные в точке В. То есть по мере движения

человека меняется не положение изображения Солнца (которое находится над водой на расстоянии $1,5 \cdot 10^8$ км!), а положение точки на поверхности воды, от которой отражаются Солнечные лучи, попадающие в глаз человеку.

Читатель: Наверное, похожий эффект получается при отражении солнечных лучей от вертикальной поверхности, например зеркальной стены?

Автор: Вы совершенно правы. Глядя на рис. 2.24, можно легко понять, как будет меняться кажущееся положение Солнца на зеркальной стене по мере движения человека к стене (положение 2) и от стены (положение 1).



СТОП! Решите самостоятельно: В15, В16, С9.

Рис. 2.24

Два зеркала

Задача 2.13. Два плоских зеркала расположены под углом 90° друг к другу, на равных расстояниях от них находится точечный источник света (рис. 2.25). Постройте все изображения источника.

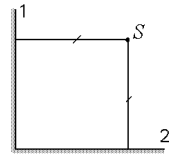


Рис. 2.25

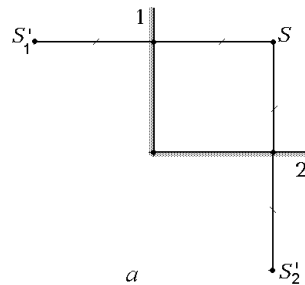
Решение.

Читатель: По-моему, это очень просто: надо просто построить изображения в 1-м и 2-м зеркале. Получатся два изображения: S'_1 и S'_2 (рис. 2.23, а).

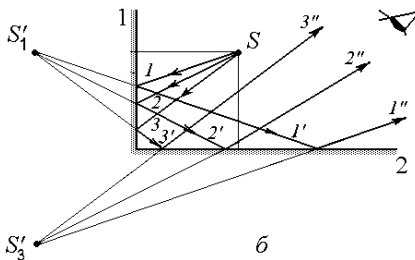
Автор: А Вы уверены, что изображений только два?

Читатель: Конечно! Раз два зеркала, значит – два изображения.

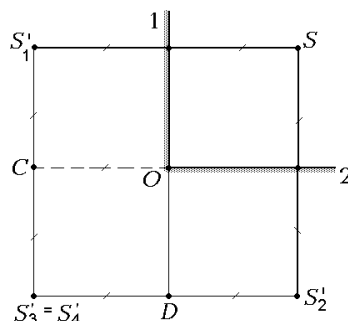
Автор: А давайте рассмотрим ход тех лучей $1'$, $2'$, $3'$, которые после отражения от первого зеркала попадают на второе и отражаются от него. Как видно из рис. 2.26, б, продолжения лучей $1''$, $2''$, $3''$ пересекаются в некоторой точке S'_3 , которая тоже является мнимым изображением точки S , ведь человеческий глаз воспримет эти лучи так, как если бы они исходили из точки S'_3 .



а



б



в

Рис. 2.26

Читатель: Похоже, что так. Но как определить положение точки S'_3 ?

Автор: Давайте рассмотрим мнимое изображение S'_1 , полученное в зеркале 1, как источник света для зеркала 2. Продолжим мысленно плоскость зеркала 2 влево (пунктирная линия OC) и построим точку S'_3 как симметричную точке S'_1 относительно прямой OC (рис. 2.26, в). Ведь лучи, которые бы исходили из реального точечного источника, находящегося в точке S'_1 (если бы он там был), шли бы к зеркалу 2 точно так же, как лучи, вышедшие из источника S , а затем отраженные от зеркала 1.

Читатель: Но тогда должно быть еще одно изображение. Ведь мнимое изображение S'_2 можно рассматривать как источник для зеркала 1. Продолжим плоскость зеркала 1 вниз (пунктирная линия OD) и построим точку S'_4 , симметричную точке S'_2 относительно прямой OD .

Автор: Вы правы, но, как видно из рис. 2.26, в, это мнимое изображение *совпадет* с мнимым изображением S'_3 . Так что мнимых изображений будет только три: S'_1 , S'_2 и S'_3 .

Правильность наших теоретических рассуждений легко проверить экспериментально. Достаточно расположить небольшой предмет рядом с двумя зеркалами, поставленными под прямым углом друг к другу, и посмотреть, сколько получилось изображений.

СТОП! Решите самостоятельно: В17, С10, С11.

Сколько света отражается?

При падении луча на какую-либо поверхность, только часть света (а значит – энергии) отражается. Доля отраженной энергии зависит, во-первых, от физических свойств вещества, из которого состоит тело, а во-вторых, от *угла падения*.

В табл. 2.1 приведены значения доли отраженной световой энергии (в процентах) для лучей, падающих на поверхности стекла и воды, в зависимости от угла их падения. Как видно из таблицы, при малых углах падения доля отраженной световой энергии невелика. Например, при $\alpha = 0^\circ$, т.е. когда свет падает перпендикулярно к отражающей поверхности, от стекла отражается лишь 4,7 % энергии, а от воды и того меньше – всего 2,0 %.

Таблица 2.1

Отражающая поверхность	Угол падения											
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	89°	90°	
Стекло	4,7			4,9	5,3	6,6	9,8	18	39	91	100	
Вода	2,0		2,1	2,2	2,5	3,4	6,0	13,5	34,5	90,0	100	

При больших углах падения, т.е. когда луч идет почти по касательной к поверхности, доля отраженной энергии, наоборот, достаточно велика. Так, при $\alpha = 89^\circ$ от поверхности стекла отражается 91 %, а от поверхности воды – 90,0 % падающей световой энергии.

Читатель: Почему, когда мы смотрим в зеркало, мы само зеркало как бы вообще не видим, а видим только изображения предметов, которые в нем получены, а когда смотрим на лист бумаги, видим только лист бумаги и больше ничего? Но ведь лучи света должны отражаться и от зеркала, и от бумаги по одному и тому же закону?

Автор: Да. Каждый *отдельно взятый луч* отражается согласно закону отражения света и от зеркала, и от бумаги, разница только в том, что поверхность зеркала – гладкая, а поверхность бумаги – шероховатая. Когда лучи от точечного источника света S падают на зеркало, они отражаются так, что их продолжения пересекаются в одной точке (рис. 2.27, а).

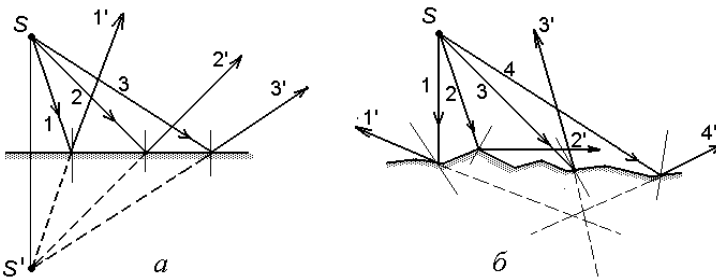


Рис. 2.27

А когда лучи от точечного источника падают на шероховатую поверхность, отраженные лучи расходятся во все стороны самым хаотическим образом, и их продолжения в одной точке не пересе-

каются, а значит, не получается и мнимого изображения источника (рис. 2.27, б). В этом случае происходит так называемое диффузное, или рассеянное отражение света, и мы видим только саму отражающую поверхность – лист бумаги, например.

СТОП! Решите самостоятельно: А12–А14, В18–В19.

Область наблюдения изображения в плоском зеркале

Задача 2.14. Укажите на рисунке область, из которой можно наблюдать изображение точечного источника света S в плоском зеркале AB (рис. 2.28).



Рис. 2.28

Решение. Область наблюдения изображения – это часть пространства, в которую попадают отраженные от зеркала лучи.

1. Построим изображение S' для случая a (рис. 2.29, a). Проведем лучи $S'B$ и $S'A$, которые являются "крайними" лучами, отраженными от зеркала AB . Любой другой луч, исходящий от источника S и отраженный от зеркала AB (например, луч l) будет находиться между лучами $S'A$ и $S'B$.

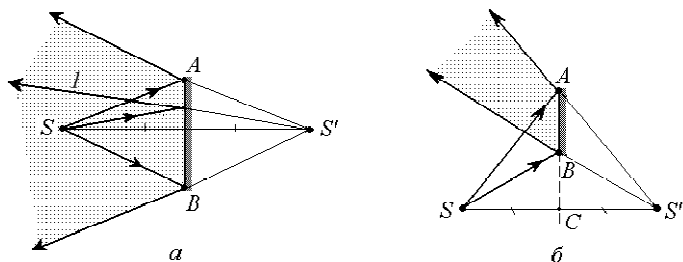


Рис. 2.29

Таким образом, область наблюдения изображения – это часть пространства между зеркалом AB и лучами $S'B$ и $S'A$ (на рис. 2.29, a она показана штриховкой).

2. В случае *б* для построения изображения S' мысленно продолжим зеркало AB вниз (пунктирная линия BC) и построим точку S' , симметричную точке S относительно прямой BC (рис. 2.29, *б*).

Читатель: Это как-то непонятно. Разве "мысленное" зеркало BC (которого на самом деле нет) может дать изображение S' ?

Автор: Положение изображения S не зависит от того, какова длина зеркала. Ведь мы же с Вами уже выяснили, что *все лучи*, исходящие из точечного источника и отраженные от плоского зеркала, идут таким образом, что их продолжения пересекаются в одной единственной точке S' , симметричной источнику S относительно плоскости зеркала. Поэтому для удобства построения мы вполне можем продлить плоскость зеркала AB до нужных нам размеров.

После того, как изображение S' построено, проведем "крайние" лучи $S'B$ и $S'A$. Область наблюдения лежит между зеркалом AB и этими лучами (она показана штриховкой на рис. 2.29, *б*). Заметим, что из точки S ее изображение S' увидеть нельзя.

Задача 2.15. Постройте область наблюдения изображения отрезка AB в плоском зеркале MN (рис. 2.30, *а*).

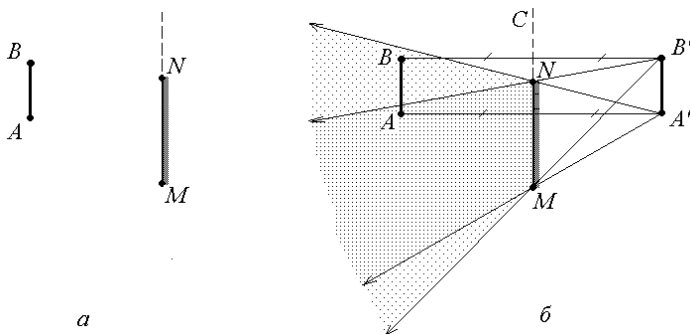


Рис. 2.30

Решение. Продолжим плоскость зеркала MN немного вверх (пунктирная линия NC) и построим изображения точек A и B . Для этого построим точки A' и B' , симметричные точкам A и B относительно прямой MNC .

Построим аналогично тому, как мы это делали в задаче 2.14, области наблюдения изображений A' и B' в зеркале MN , для чего

проведем "крайние лучи" $A'M$, $A'N$, $B'M$ и $B'N$ (рис. 2.30, б). Изображение $A'B'$ можно будет наблюдать из тех точек пространства, из которых можно одновременно наблюдать точки A' и B' . Эта область показана на рис. 2.30, б двойной штриховкой.

СТОП! Решите самостоятельно: А16, В20, В21, С12.

Задача 2.16. Чем ближе человек стоит к окну, тем больший участок улицы ему виден. Но если он видит в зеркале, висящем вертикально на стене, свое отражение только до колен, то все попытки увидеть больше, подойдя к зеркалу, остаются безуспешными. Почему?

Решение. Пусть человек высотой H находится на расстоянии l от зеркала высотой a , смотрит на свое изображение и видит лишь часть своей фигуры высотой h (рис. 2.31).

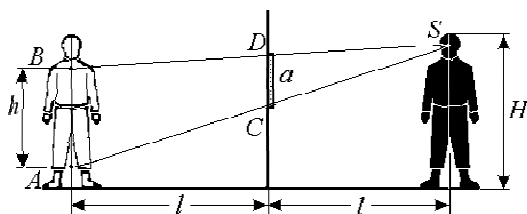


Рис. 2.31

Как видно из рисунка, $\Delta SCD \sim \Delta SAB$, поэтому

$$\frac{h}{a} = \frac{2l}{l} = 2 \Rightarrow h = 2a,$$

т.е. величина видимой части изображения *не зависит* ни от высоты человека, ни от его расстояния до зеркала и всегда равна удвоенной высоте зеркала! Поэтому как бы близко человек не подходил к зеркалу, он всегда увидит только часть фигуры, и размер этой части всегда один и тот же – удвоенная высота зеркала.

СТОП! Решите самостоятельно: В22, В23, С13–С15.

Солнечный зайчик

Автор: Наверное, вам не раз приходилось видеть и даже пускать солнечных «зайчиков». Как Вы думаете, что такое солнечный «зайчик» на стене?

Читатель: По-моему, это то место, куда зеркалом направляют солнечный луч.

Автор: Вы правы. Но давайте сформулируем эту мысль четче. Зеркало создает мнимое изображение Солнца (рис. 2.32). Это изображение, как мы знаем, можно видеть только из области наблюдения изображения. Солнечный «зайчик» – это место на стене, откуда, посмотрев на зеркало, можно увидеть изображение Солнца.

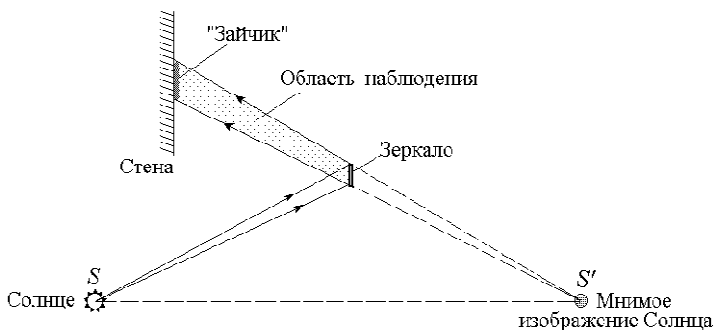


Рис. 2.32

Заметим, что «зайчик» можно получить не только от Солнца, но и от обычной лампочки.

«Зайчик» от точечного источника света. Попробуем выяснить, зависит ли форма и размеры «зайчика» от формы, размеров и положения зеркала, а также от расстояния зеркала до экрана.

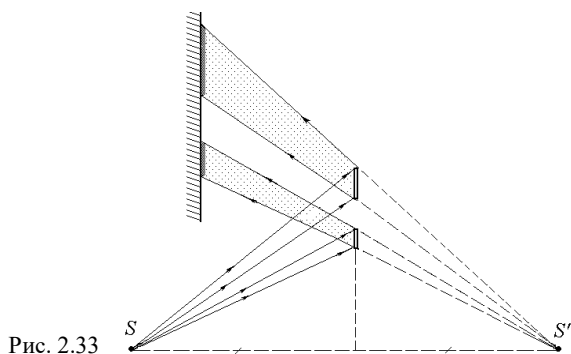


Рис. 2.33

Как видно из рис. 2.33, чем больше зеркало, тем больше «зайчик».

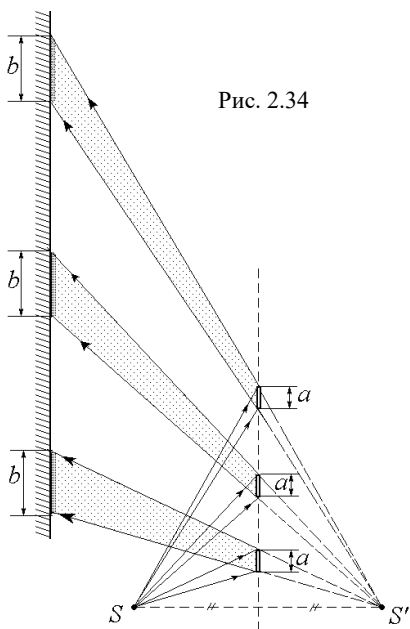


Рис. 2.34

Ясно, что форма «зайчика» зависит также от формы зеркала. Если изображение S' расположить настолько далеко от зеркала, что лучи, проходящие через зеркало, практически параллельны, то как видно из рис. 2.34, от расстояния до источника и от угла падения лучей источника на зеркало размер «зайчика» не зависит.

Если же расстояние от S' до зеркала невелико, то размеры «зайчика» будут тем больше, чем меньше это расстояние.

СТОП! Решите самостоятельно: С16, С17.

«Зайчик» от источника конечных размеров. Солнце не является точечным источником света, поэтому область наблюдения изображения Солнца в зеркале зависит от размеров зеркала. Чем больше зеркало, тем больше область, из которой можно увидеть изображения Солнца *полностью*. На рис. 2.35 видно, что область наблюдения Солнца для зеркала 2 значительно больше, чем для зеркала 1 (область наблюдения показана штриховкой).

Кроме того, из рис. 2.35 видно, что чем ближе к зеркалу находится экран, тем больше на этом экране область, из которой изображение Солнца видно полностью. А это значит, что «зайчик» на таком экране получится ярким с достаточно четкими краями и близкий по форме к форме зеркала (экран 1 на рис. 2.25).

Если же экран стоит далеко от зеркала, то область на экране, из которой видно изображение Солнца, *целиком* становится меньше, но зато увеличивается область, из которой видна *часть изображения* Солнца (экран 2 на рис. 2.35). Это значит, что «зайчик» становится большим, слабым и с нечеткими краями.

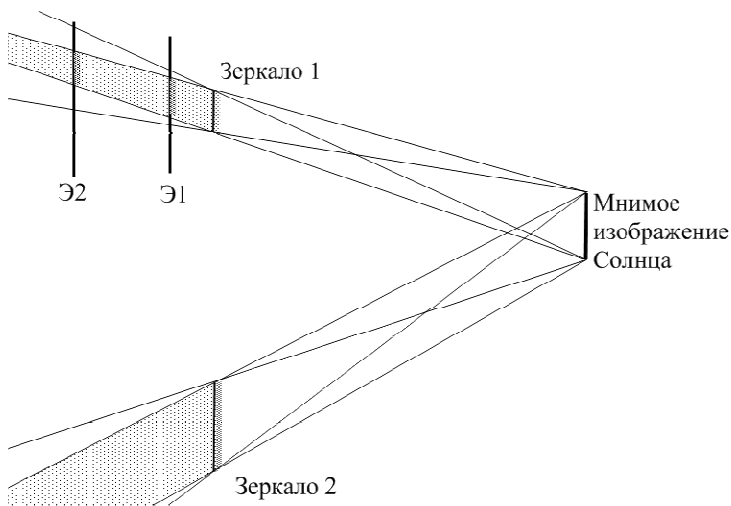


Рис. 2.35

СТОП! Решите самостоятельно: В24–В26.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Задачи легкие

А1. На рис. 2.36 показаны три плоских зеркала. На каждое из них падает горизонтальный луч света. В каком направлении следует искать след отраженного луча – «зайчик»? Ответы сопроводить чертежами.

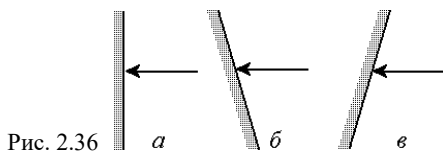


Рис. 2.36

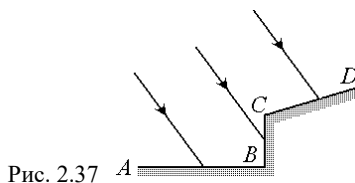


Рис. 2.37

А2. На отражающую поверхность $ABCD$ (рис. 2.37) падает пучок параллельных лучей. Повторив чертеж в тетради, начертить отраженные лучи. Параллельны ли они?

А3. В каком случае угол падения светового луча на зеркало меньше (рис. 2.38)?



Рис. 2.38

A4. При каком угле падения луча на зеркало падающий и отраженный лучи совпадают?

A5. Угол падения луча равен 25° . Чему равен угол между падающим и отраженным лучами?

A6. Угол между зеркалом и падающим на него лучом составляет 30° (см. рис. 2.38, а). Чему равен угол отражения луча? Чему равен угол падения луча (см. рис. 2.38, б)?

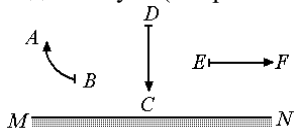


Рис. 2.39

A7. Постройте мнимые изображения предметов в плоском зеркале MN (рис. 2.39).

A8. Куда переместятся изображения предметов (см. рис. 2.39), если зеркало MN передвинуть: а) вправо; влево; б) вверх; вниз?



Рис. 2.40

A9. В плоском зеркале мнимое изображение юного спортсмена с мячом имеет вид, показанный на рис. 2.40. В какой руке спортсмен держит мяч?

A10. Почему конец пальца, приложенный к зеркалу, не совпадает с концом изображения пальца? В каких зеркалах это явление не будет иметь места?

A11. Как, приставив конец пальца к стеклянному плоскому зеркалу, можно оценить толщину зеркального стекла?

A12. Справедливы ли законы отражения в случае падения света на лист тетрадной бумаги?

A13. Почему окна домов кажутся днем темными, если на них смотреть с улицы?

A14. Ранним утром изображение Солнца в спокойной воде слепит глаза, а в полдень на это же изображение можно смотреть даже без темных очков. Почему?

A15. При проверке остроты зрения врач предлагает читать буквы на специальной таблице с расстояния 5 м. Как можно поступить, если размеры врачебного кабинета меньше этого расстояния, а таблицу изменить нельзя?

A16. Можно ли в воде глубокого колодца увидеть отражение Солнца?

Задачи средней трудности

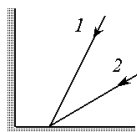


Рис. 2.41

B1. На одно из двух зеркал, расположенных под прямым углом друг к другу, падают лучи 1 и 2 (рис. 2.41). Перечертив рисунок в тетрадь, постройте дальнейший ход этих лучей.

В2. Какими будут после отражения от плоского зеркала сходящийся, расходящийся и параллельный пучки света (рис. 2.42)?

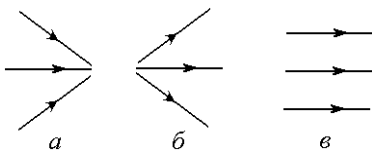


Рис. 2.42

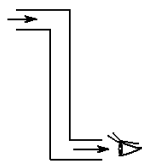


Рис. 2.43

В3. На рис. 2.43 показана труба перископа. Перерисуйте этот рисунок к себе в тетрадь и покажите на нем, как должны быть расположены зеркала внутри перископа.

В4. Угол между падающим и отражённым лучами равен 40° . Каким будет угол отражения, если угол падения увеличится на 15° ?

В5. На зеркало падает световой луч. Зеркало поворачивают на $1,0^\circ$ около оси, лежащей в плоскости зеркала перпендикулярно к лучу. На какой угол α при этом повернется отраженный луч? На какое расстояние x переместится световой зайчик на экране, расположенном перпендикулярно к отраженному лучу на расстоянии $l = 5,0$ м от зеркала?

В6. Зеркальный гальванометр расположен на расстоянии $R = 2$ м от шкалы. На какой угол повернулось зеркальце, если «зайчик» сместился от центра шкалы на 50 см?

В7. На рис. 2.44 изображен автобус в плане. В точке A находится шофер, в точке C – дверь для выхода пассажиров из автобуса. Через точку B проходит вертикальная ось, вокруг которой может вращаться плоское зеркало DE . Найти построением, как надо расположить зеркало DE , чтобы шофер мог видеть выходящих из автобуса пассажиров.

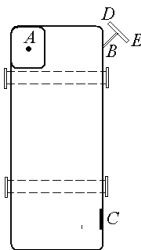


Рис. 2.44

В8. Солнечный луч, проходящий через отверстие в ставне составляет с поверхностью стола угол 48° . Как надо расположить плоское зеркало, чтобы изменить направление луча на горизонтальное?

В9. На предмет AB высотой h , стоящий на плоском зеркале, падает параллельный пучок лучей. Определить размер геометрической тени на экране (рис. 2.45).

В10. На новогодней елке две лампочки (свечи) находились в точках A и B (рис. 2.46). Построением покажите, где перед зеркалом LL , укрепленным на стене вертикально, находился глаз мальчика, уви-

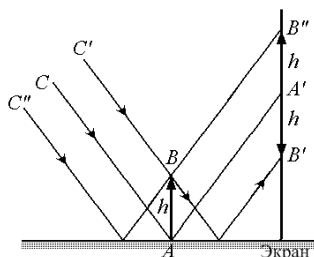


Рис. 2.45

двешего в зеркале изображения этих лампочек наложенными друг на друга?

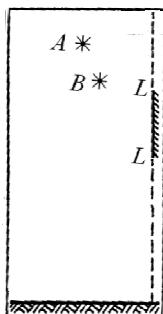


Рис. 2.46

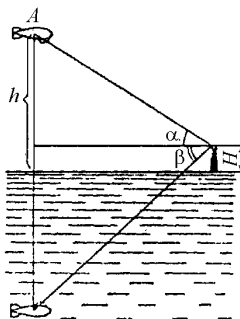


Рис. 2.47

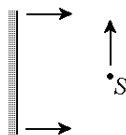


Рис. 2.48

В11. На какой высоте h находится аэростат A , если с башни высотой H он виден под углом α над горизонтом, а его изображение в озере видно под углом β под горизонтом (рис. 2.47)?

В12. Точка S движется со скоростью 3 см/с , а зеркало – со скоростью 2 см/с (рис. 2.48). С какой скоростью движется отражение точки S ? (Зеркало движется поступательно.)

В13. На горизонтальном столе лежит шар. Под каким углом к плоскости стола нужно установить зеркало, чтобы при движении шара к зеркалу изображение шара двигалось по вертикали?

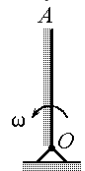


Рис. 2.49

В14. Зеркало OA вращается с угловой скоростью ω (рис. 2.49). С какой скоростью движется изображение точки S ? (Точка S неподвижна, расстояние OS равно l .)

В15. Человек, стоящий на берегу озера, видит в гладкой поверхности воды изображение Солнца. Как будет перемещаться это изображение при удалении человека от озера? Солнечные лучи считать параллельными.

В16. Используя условие задачи В15, найти, на сколько человек должен наклониться (понижить уровень глаз), чтобы изображение Солнца в воде приблизилось к берегу на 80 см , если высота Солнца над горизонтом 25° .

В17. Что вы увидите, если будете смотреть в два зеркала, поставленные под прямым углом друг к другу?

В18. Почему ночью лужа на неосвещенной дороге кажется водителю темным пятном на светлом фоне?

В19. В летний солнечный день асфальтированное шоссе кажется блестящим, если смотреть вдаль. Почему?

В20. Предмет $O'O$ и зеркало AC расположены, как указано на рис. 2.50. Построить изображение этого предмета в зеркале. Где следует расположить глаз, чтобы увидеть изображение всего предмета целиком?

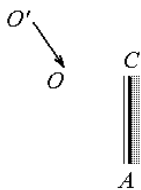


Рис. 2.50

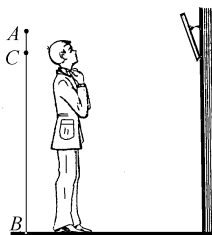


Рис. 2.51

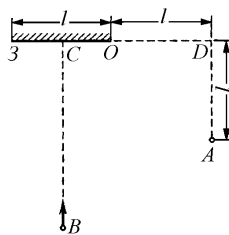


Рис. 2.52

В21. Человек смотрится в зеркало, висящее на стене с небольшим наклоном (рис. 2.51). Построить изображение человека в зеркале. Какую часть своего тела будет видеть человек? При построении можно изобразить человека в виде отрезка AB , расположив глаз в точке C .

В22. Сбоку от зеркала Z в точке A стоит человек (рис. 2.52), второй человек приближается к зеркалу по перпендикуляру BC , проходящему через середину зеркала. Размер зеркала равен $2CO = OD = DA = l = 1$ м. На каком расстоянии x от зеркала будет находиться второй человек в момент, когда оба увидят друг друга в зеркале?

В23. Какова должна быть минимальная высота вертикального зеркала, чтобы человек ростом H мог видеть в нем свое изображение во весь рост? На какой высоте должно висеть зеркало?

В24. Квадратное зеркало Z лежит на столе. Какую форму будет иметь солнечный зайчик от него на вертикальном экране Э (рис. 2.53)?

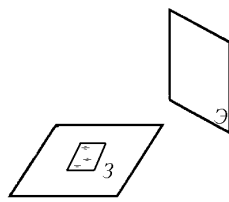


Рис. 2.53

В25. При каких условиях форма солнечного «зайчика» от небольшого зеркала не будет зависеть от формы зеркала?

В26. Какую форму будет иметь световой «зайчик», если размеры зеркала малы, а размеры источника велики?

Задачи трудные

С1. Изобразить два взаимно перпендикулярных зеркала AO и OB , луч CD , падающий на зеркало OB , и направления DE и EF дальнейшего хода этого луча. Доказать, что луч EF параллелен лучу CD при любом угле падения луча CD .

C2. Плоское зеркало вращается с постоянной угловой скоростью. Число оборотов в секунду $n = 0,50$. С какой скоростью будет перемещаться «зайчик» по сферическому экрану радиусом 10 м, если зеркало находится в центре кривизны экрана?

C3. Высота Солнца над горизонтом составляет $\alpha = 38^\circ$. Под каким углом β к горизонту следует расположить зеркало, чтобы осветить солнечными лучами дно вертикального колодца?

C4. В пасмурный день в степи юный натуралист, подойдя к одиноко стоящей березе, решил, не влезая на березу, определить ее высоту. Мог ли он это сделать и как, имея лишь карманное зеркало и зная свой рост и размер обуви?

C5. Луч света, направленный горизонтально, падает на вертикально стоящий экран. Если на пути луча поместить плоское зеркало, то световое пятно на экране смещается вверх на $h = 3,5$ см (рис. 2.54). Определить угол падения луча на зеркало, если расстояние от зеркала до экрана $l = 50$ см.

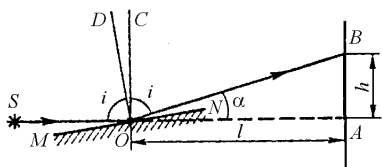


Рис. 2.54

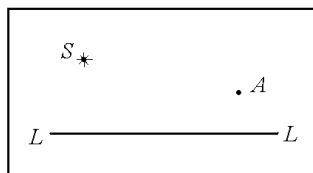


Рис. 2.55

C6. На рис. 2.55 показано положение S лампы и точки A относительно поверхности LL стола. Построением покажите на столе точку O , где надо положить плоское зеркало, чтобы «зайчик» попал в точку A .

C7. Точка S движется со скоростью v , а зеркало – со скоростью v' (рис. 2.56). При каком значении v изображение точки S будет неподвижным? (Зеркало движется поступательно.)

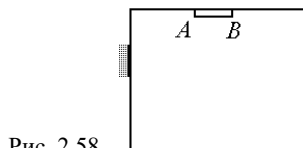
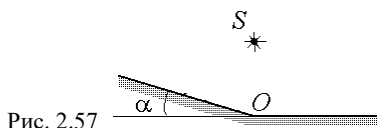
C8. Плоское зеркало со столом образует двугранный угол α . На столе на расстоянии l от ребра двугранного угла расположена монета. Определить расстояние d , на которое смещается изображение монеты в зеркале при его повороте на угол φ относительно ребра двугранного угла.

C9. Город раскинулся на восточном склоне горы. Утром усталый путешественник, расположившийся на отдых у подножья горы, видит отражение Солнца в оконных стеклах. Он замечает, что «светящиеся» окна со временем перемещаются: в одних домах «гаснут», а в других – «зажигают».

ются». Куда они перемешаются: вверх или вниз, направо или налево? Объясните данное явление.

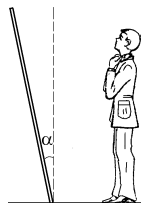
С10. Постройте изображение предмета (точки) в двух плоских зеркалах, угол между которыми равен 60° . Сколько изображений получается? Расстояния от предмета до зеркал равны.

С11. Доказать, что источник и два изображения его, получаемых от зеркал, расположенных под углом α друг к другу (рис. 2.57), лежат на окружности. Указать расположение центра этой окружности.



С12. В каких точках комнаты должен находиться человек, чтобы видеть в зеркале экран телевизора AB (рис. 2.58) целиком?

С13. На стене, плоскость которой отклонена на угол $\alpha = 4,87^\circ$, укреплено плоское зеркало. С какого максимального расстояния l человек, рост которого $h = 170$ см, сможет увидеть в зеркале хотя бы часть своего изображения (рис. 2.59)? Считать, что глаза человека находятся на высоте h .



С14. На стене висит зеркало высотой 1 м. Человек стоит на расстоянии 2 м от зеркала. Какова высота участка противоположной стены комнаты, который может увидеть в зеркале человек, не изменяя положения головы? Стена находится на расстоянии 4 м от зеркала.

С15. Рост человека H , ширина плеч b . Оцените минимальную площадь прямоугольного плоского зеркала, установленного вертикально в комнате, став перед которым и зажмурив один глаз, можно четко видеть свое изображение не только в ширину, но и во весь рост.

С16. Плоское зеркало расположено параллельно стене на расстоянии l от нее. Свет от укрепленного на стене точечного источника падает на зеркало и, отражаясь, дает на стене «зайчик». С какой скоростью будет двигаться «зайчик» по стене, если приближать к ней зеркало со скоростью v ? Как будут меняться размеры «зайчика»?

С17. Посередине плоского экрана находится точечный источник света. Параллельно экрану расположено плоское зеркало в форме равностороннего треугольника со стороной $a = 10$ см. Определите площадь «зайчика» S на экране.

Задачи очень трудные

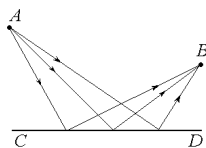


Рис. 2.60

D1. Луч света, идущий из точки A , приходит в точку B , отразившись от плоской пластины CD (рис. 2.60). Докажите, что, «подчиняясь» закону отражения, луч «выбирает» кратчайший путь.

D2. Два человека стоят на расстояниях l_1 и l_2 от вертикальной стены и на расстоянии l_0 друг от друга. Первый громко произносит короткое слово. За какое время он должен произнести это слово, чтобы второй человек услышал конец слова совпадающим с началом эха? Скорость звука в воздухе равна c . (Закон отражения звука точно такой же, как для световых лучей.)

§ 3. Сферические зеркала

Что такое сферическое зеркало?

Мы уже знаем, что плоское зеркало – это просто плоская отражающая поверхность. Если сделать отражающую поверхность сферической, то получим сферическое зеркало. (Напомним, что сферической поверхностью называется поверхность шара.)

Сферические зеркала бывают двух типов: *вогнутые* и *выпуклые*. В вогнутом зеркале отражающей является *внутренняя* поверхность сферы, а в выпуклом – *внешняя* поверхность сферы (рис. 3.1).

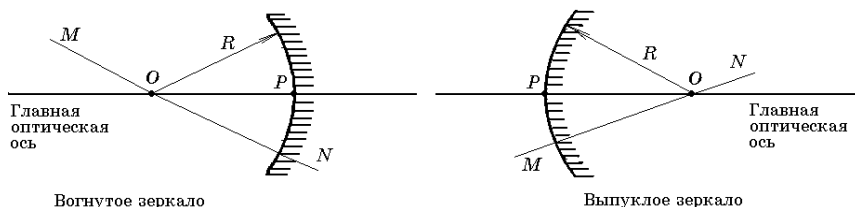


Рис. 3.1

Центр сферы, частью которой является данное сферическое зеркало (точки O на рис. 3.1) называется *центром зеркала*.

Средняя точка имеющейся сферической поверхности (точки P на рис. 3.1) называется *полюсом зеркала*.

Прямая, проходящая через центр зеркала – точку O и полюс зеркала – точку P , называется *главной оптической осью* зеркала.

Любая прямая, проходящая через центр зеркала и пересекающая поверхность зеркала (прямая MN на рис. 3.1), называется *побочной оптической осью* зеркала.

Что будет, если на сферическое зеркало направить параллельный пучок лучей?

Если пучок лучей, параллельных главной оптической оси, направить на вогнутое зеркало, то все отраженные лучи пересекутся в одной точке F_1 , которая называется *главным фокусом вогнутого зеркала* (рис. 3.2,а).

Если пучок лучей, параллельных главной оптической оси, направить на выпуклое зеркало, то отраженные лучи образуют расходящийся пучок, но *продолжения отраженных лучей* пересекутся в одной точке F_2 , которая называется *главным фокусом выпуклого зеркала* (рис. 3.2,б).

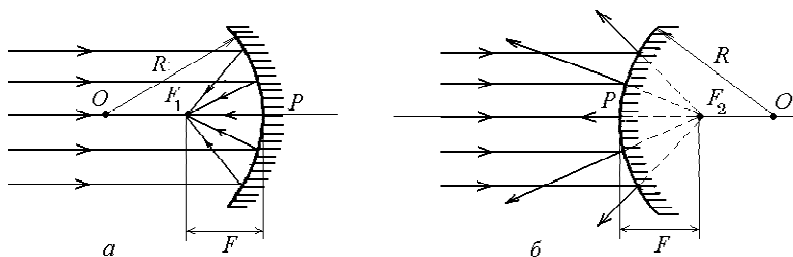


Рис. 3.2

Расстояние F от полюса до главного фокуса называется *фокусным расстоянием сферического зеркала*.

Экспериментально установлено, что фокусное расстояние и для вогнутого, и для выпуклого зеркала равно:

$$F = \frac{R}{2}, \quad (3.1)$$

где R – радиус зеркала.

Практические выводы. Вогнутое зеркало можно использовать для добывания огня. В самом деле, если поставить вогнутое

зеркало под пучок солнечного света так, чтобы его главная оптическая ось была направлена на Солнце, то после отражения солнечные лучи соберутся в главном фокусе зеркала. Если поместить в главный фокус зеркала какой-либо легковоспламеняющийся предмет, например кусочек черной бумаги или засвеченную фотопленку, то через некоторое время этот предмет загорится. (Не верите – проверьте экспериментально!)

Читатель: А что будет, если в главном фокусе вогнутого зеркала поместить точечный источник света?

Автор: Давайте попробуем сначала ответить на вопрос: что будет, если отраженный от зеркала луч пустить в обратном направлении (рис. 3.3, *a*)?

Читатель: Этот луч станет падающим, и угол падения будет равен α . Тогда и угол отражения тоже будет равен α , значит, отраженный луч совпадет с падающим (рис. 3.3, *b*).

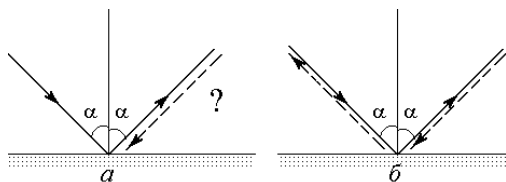


Рис. 3.3

Автор: Верно. Причем это справедливо для любой *формы* отражающей поверхности: плоской, сферической или какой-либо еще. Но тогда получается, что луч, пущенный в обратном направлении, движется по той же траектории, что и луч, идущий в прямом направлении. Это утверждение является частным случаем принципа обратимости (или взаимности) световых лучей, о котором мы поговорим в дальнейшем. А пока вернемся к нашему вопросу.

Если источник находится в главном фокусе вогнутого зеркала. то согласно принципу обратимости световых лучей отраженные от зеркала лучи образуют параллельный пучок. В *идеале* толщина этого пучка не должна меняться с расстоянием от зеркала. Это значит, что, направив такой пучок на предмет, удаленный на большое расстояние от зеркала (скажем, на 1 км), мы должны увидеть на этом предмете светлое пятно, размер которого равен размеру нашего зеркала.

На самом деле такого, конечно, не получится, так как невозможно создать ни точечный источник света, ни идеальное сферическое зеркало. Но *слабо расходящийся* пучок света с помощью вогнутого зеркала создать можно. Для этого достаточно поместить электрическую лампу накаливания в фокусе вогнутого зеркала.

Если взять большое зеркало с хорошей отражающей поверхностью и лампу мощностью несколько тысяч ватт, то получится достаточно мощный *прожектор*, который будет "бить" (ярко освещать предметы) на расстоянии в несколько километров (рис. 3.4).

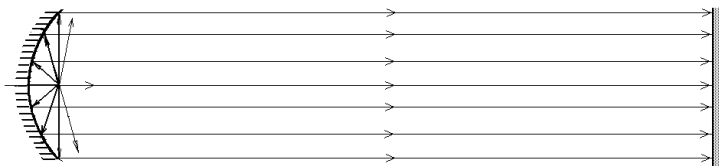


Рис. 3.4

По такому же принципу устроены фары дальнего света у автомобилей, правда, "бьют" они всего на несколько десятков метров.

СТОП! Решите самостоятельно: А1, В1.

Что будет, если перед сферическим зеркалом поместить точечный источник света?

Оказывается, что в этом случае возможны три варианта:

1) отраженные лучи образуют параллельный пучок;
2) *все* отраженные лучи пересекутся в одной точке, образуя тем самым действительное изображение источника (рис. 3.5, а);

3) отраженные лучи образуют расходящийся пучок, но продолжения *всех* отраженных лучей пересекутся в одной точке, образуя тем самым мнимое изображение источника (рис. 3.5, б).

Здесь нам следует сделать одну маленькую, но существенную оговорку: все эти утверждения справедливы *только* для лучей, составляющих небольшие (не более 5° !) углы с главной оптической осью зеркала (напомним, что такие лучи называют *параксиальными*). Но даже для параксиальных лучей, *строго говоря*, приведенные выше утверждения *неверны!* Однако в физике, как мы знаем,

измерить что-либо *абсолютно точно* невозможно. Поэтому даже «приближенные» законы на практике бывают очень полезны, особенно если расчеты, производимые на основе этих законов, достаточно просты.

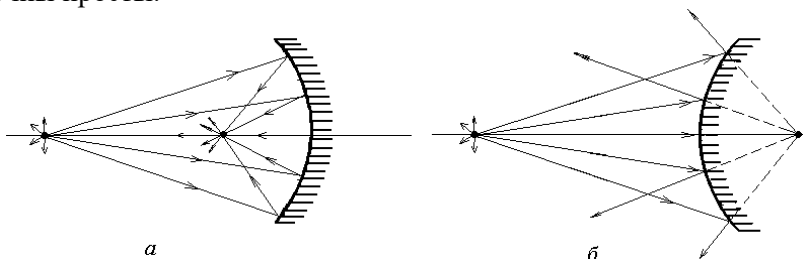


Рис. 3.5

Построение изображений в сферических зеркалах

Для того чтобы построить изображение любого точечного источника света в сферическом зеркале, достаточно построить ход *любых двух лучей*, исходящих из этого источника и отраженных от зеркала. Точка пересечения самих отраженных лучей даст действительное изображение источника, а точка пересечения продолжений отраженных лучей – мнимое.

Характерные лучи. Для построения изображений в сферических зеркалах удобно пользоваться определенными *характерными* лучами, ход которых легко построить.

1. Луч I , падающий на зеркало параллельно главной оптической оси, отразившись, проходит через главный фокус зеркала в вогнутом зеркале (рис. 3.6, *а*); в выпуклом зеркале через главный фокус проходит продолжение отраженного луча I' (рис. 3.6, *б*).

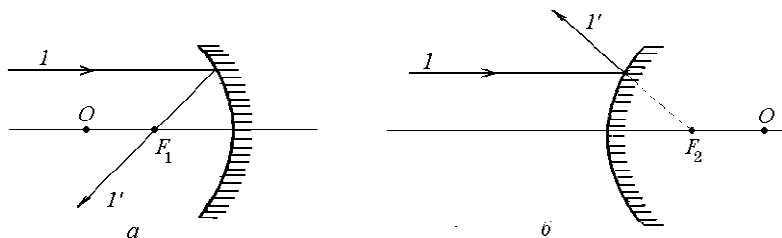


Рис. 3.6

2. Луч 2, проходящий через главный фокус вогнутого зеркала, отразившись, идет параллельно главной оптической оси – луч 2' (рис. 3.7,а). Луч 2, падающий на выпуклое зеркало так, что его продолжение проходит через главный фокус зеркала, отразившись, также идет параллельно главной оптической оси – луч 2' (рис. 3.7, б).

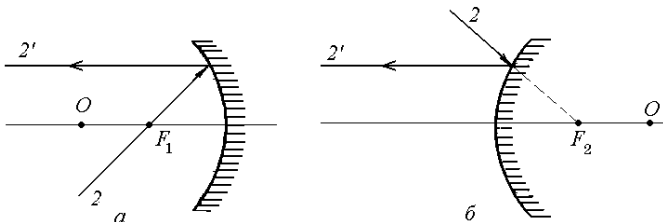


Рис. 3.7

3. Рассмотрим луч 3, проходящий через *центр* вогнутого зеркала – точку O (рис. 3.8, а) и луч 3, падающий на выпуклое зеркало так, что его продолжение проходит через центр зеркала – точку O (рис. 3.8, б). Как мы знаем из геометрии, радиус окружности перпендикулярен касательной к окружности в точке касания, поэтому лучи 3 на рис. 3.8 падают на зеркала под *прямым углом*, то есть углы падения этих лучей равны нулю. А значит, отраженные лучи 3' в обоих случаях совпадают с падающими.

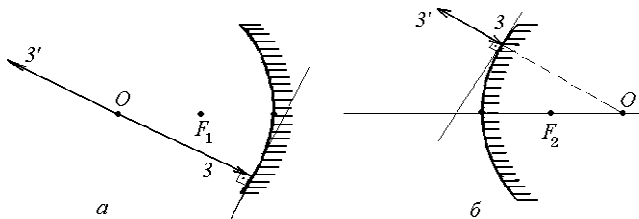


Рис. 3.8

4. Луч 4, проходящий через *полюс* зеркала – точку P , отражается симметрично относительно главной оптической оси (лучи 4' на рис. 3.9), поскольку угол падения равен углу отражения.

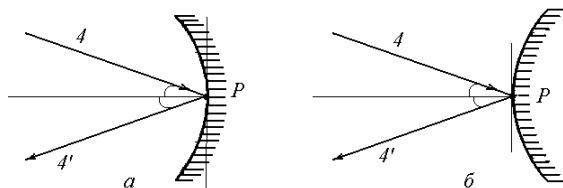


Рис. 3.9

СТОП! Решите самостоятельно: А2, А5.

Читатель: Как-то я взял обычную столовую ложку и попытался разглядеть в ней свое изображение. Изображение я увидел, но оказалось, что если смотреть на *выпуклую* часть ложки, то изображение *прямое*, а если на *вогнутую*, то *перевернутое*. Интересно, почему это так? Ведь ложку, я думаю, можно рассматривать как некоторое подобие сферического зеркала.

Автор: Чтобы разобраться в этом вопросе, решим следующую задачу.

Задача 3.1. Постройте изображения небольших вертикальных отрезков одинаковой длины в вогнутом зеркале (рис. 3.10). Фокусное расстояние задано. Считается известным, что изображения небольших прямолинейных отрезков, перпендикулярных главной оптической оси, в сферическом зеркале представляют собой также небольшие прямолинейные отрезки, перпендикулярные главной оптической оси.

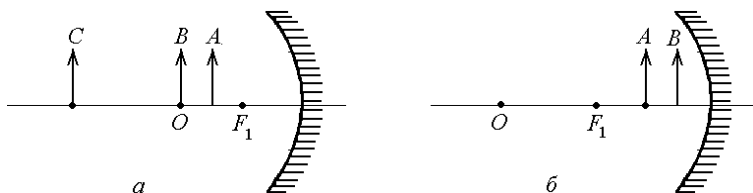


Рис. 3.10

Решение.

1. *Случай а.* Заметим, что в данном случае все предметы находятся перед главным фокусом вогнутого зеркала.

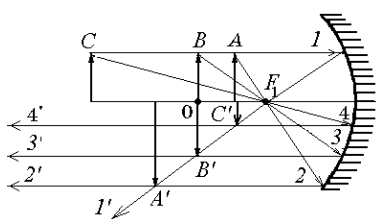


Рис. 3.11

Будем строить изображения только верхних точек наших отрезков. Для этого проведем через все верхние точки: A , B и C один общий луч 1 , параллельный главной оптической оси (рис. 3.11). Отраженный луч $1'$ пройдет через главный фокус зеркала – точку F_1 .

Теперь из точек A , B и C пустим лучи 2 , 3 и 4 через главный фокус зеркала. Отраженные лучи $2'$, $3'$ и $4'$ пойдут параллельно главной оптической оси.

Точки пересечения лучей $2'$, $3'$ и $4'$ с лучом $1'$ являются изображениями точек A , B и C . Это точки A' , B' и C' на рис. 3.11.

Чтобы получить изображения *отрезков* достаточно опустить из точек A' , B' и C' перпендикуляры на главную оптическую ось.

Как видно из рис. 3.11, все изображения получились *действительными* и *перевернутыми*.

Читатель: А что значит – действительными?

Автор: Изображение предметов бывает *действительным* и *мнимым*. С мнимым изображением мы уже познакомились, когда изучали плоское зеркало: мнимое изображение точечного источника – это точка, в которой пересекаются *продолжения* отраженных от зеркала лучей. Действительное изображение точечного источника – это точка, в которой пересекаются *сами* отраженные от зеркала лучи.

Заметим, что чем *дальше* находился предмет от зеркала, тем *меньшим* получилось его изображение и тем *ближе* это изображение к *фокусу зеркала*. Заметим также, что изображение отрезка, нижняя точка которого совпадала с *центром* зеркала – точкой O , получилось *симметричным* предмету относительно главной оптической оси.

Надеюсь, теперь Вам понятно, почему, рассматривая свое отражение в вогнутой поверхности столовой ложки, Вы увидели себя уменьшенным и перевернутым: ведь предмет (Ваше лицо) находилось явно *перед* главным фокусом вогнутого зеркала.

2. *Случай б.* В данном случае предметы находятся *между* главным фокусом и поверхностью зеркала.

Первый луч – луч 1 , как и в случае *а*, пусть через верхние точки отрезков – точки A и B параллельно главной оптической оси. Отраженный луч $1'$ пройдет через главный фокус зеркала – точку F_1 (рис. 3.12).

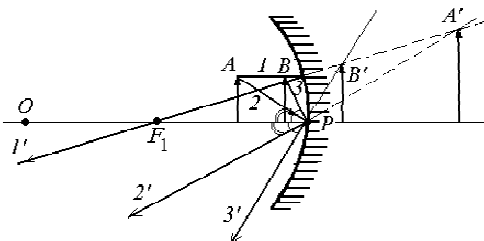


Рис. 3.12

Теперь воспользуемся лучами 2 и 3, исходящими из точек A и B и проходящими через *полюс* зеркала – точку P . Отраженные лучи 2' и 3' составляют с главной оптической осью те же углы, что и падающие лучи.

Как видно из рис. 3.12, отраженные лучи 2' и 3' *не пересекаются* с отраженным лучом 1'. Значит, *действительных изображений* в данном случае *нет*. Зато *продолжения* отраженных лучей 2' и 3' пересекаются с *продолжением* отраженного луча 1' в точках A' и B' *за зеркалом*, образуя *мнимые изображения* точек A и B .

Опустив перпендикуляры из точек A' и B' на главную оптическую ось, получим изображения наших отрезков.

Как видно из рис. 3.12, изображения отрезков получились *прямыми* и *увеличенными*, причем чем *ближе* предмет к главному фокусу, тем *больше* его изображение и тем *дальше* это изображение от зеркала.

СТОП! Решите самостоятельно: А3, А4.

Задача 3.2. Постройте изображения двух небольших одинаковых вертикальных отрезков в выпуклом зеркале (рис. 3.13).

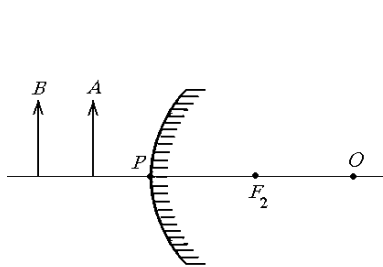


Рис. 3.13

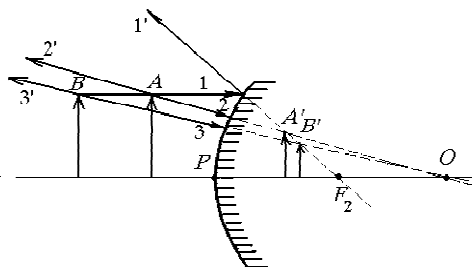


Рис. 3.14

Решение. Пустим луч 1 через верхние точки отрезков A и B параллельно главной оптической оси. Отраженный луч 1' пойдет так, что его продолжение пересечет главный фокус зеркала – точку F_2 (рис. 3.14).

Теперь пустим на зеркало лучи 2 и 3 из точек A и B так, чтобы продолжения этих лучей проходили через *центр* зеркала – точку O . Эти лучи отразятся так, что отраженные лучи 2' и 3' *совпадут* с *падающими* лучами.

Как видим из рис. 3.14, отраженный луч I' не пересекается с отраженными лучами $2'$ и $3'$. Значит, *действительных* изображений точек A и B нет. Зато *продолжение* отраженного луча I' пересекается с *продолжениями* отраженных лучей $2'$ и $3'$ в точках A' и B' . Следовательно, точки A' и B' – *мнимые* изображения точек A и B .

Для построения изображений *отрезков* опустим перпендикуляры из точек A' и B' на главную оптическую ось. Как видно из рис. 3.14, изображения отрезков получились *прямыми* и *уменьшенными*. Причем чем *ближе* предмет к зеркалу, тем *больше* его изображение и тем *ближе* оно к зеркалу. Однако даже очень удаленный предмет не может дать изображение, удаленное от зеркала *дальше главного фокуса зеркала*.

Надеюсь, теперь понятно, почему, рассматривая свое отражение в выпуклой поверхности ложки, вы видели себя уменьшенным, но не перевернутым.

СТОП! Решите самостоятельно: А6.

Как построить отраженный луч по данному падающему?

Задача 3.3. Дан ход луча I , падающего на вогнутое зеркало в точке K (рис. 3.15). Постройте ход отраженного луча. Главный фокус и центр зеркала заданы.

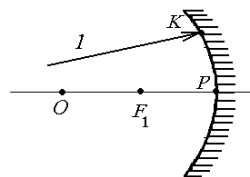


Рис. 3.15

Решение. Прежде чем решать данную задачу, выясним, что произойдет, если на вогнутое зеркало направить пучок лучей, параллельных какой-либо *побочной* оптической оси. Оказывается, что в этом случае отраженные от зеркала лучи пересекутся в *побочном фокусе* зеркала – точке f , лежащей на расстоянии $F = \frac{R}{2}$ от поверхности зеркала (рис. 3.16).

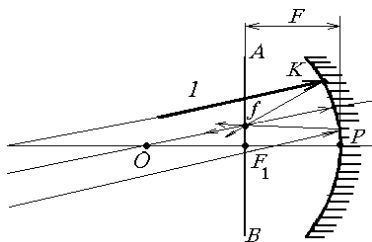


Рис. 3.16

Если рассматривать лучи, составляющие только *небольшие* углы с главной оптической осью, то можно *приближенно* считать, что все побочные фокусы зеркала лежат в одной плоскости, перпендикулярной главной оптической оси и проходящей через главный фокус зеркала. Эта плоскость называется *фокальной плоскостью* вогнутого зеркала. На рис. 3.16 фокальная плоскость показана отрезком AB .

Теперь приступим собственно к решению задачи.

1. Проведем через центр зеркала (точку O) луч 2, параллельный данному падающему лучу 1 (рис. 3.17, а). Отраженный луч 2' совпадает с падающим лучом 2.

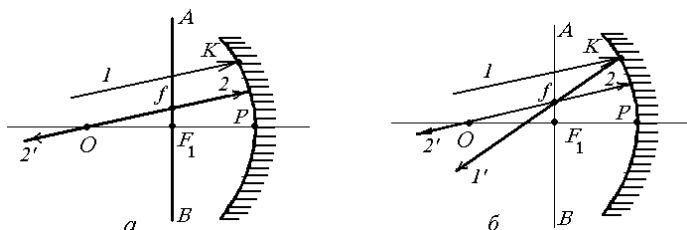


Рис. 3.17

2. Через точку F_1 проведем фокальную плоскость AB . Точка пересечения луча 2' с плоскостью AB – точка f – это побочный фокус зеркала (см. рис. 3.17, а). Следовательно, все лучи, падающие на зеркало параллельно побочной оптической оси, которая совпадает с лучом 2, после отражения пересекутся в точке f , а значит, через эту точку пройдет и отраженный луч $1'$.

3. Проведем прямую через точку K и побочный фокус f , получим ход отраженного луча $1'$ (рис. 3.17, б).

СТОП! Решите самостоятельно: В2, В3.

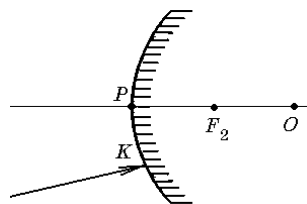


Рис. 3.18

Задача 3.4. Дан ход луча I , падающего на выпуклое сферическое зеркало в точке K (рис. 3.18). Постройте ход отраженного луча. Главный фокус и центр зеркала заданы.

Решение. Сначала выясним, что произойдет, если на выпуклое зеркало

направить пучок лучей, параллельных какой-либо побочной оптической оси (рис. 3.19, а). Оказывается, что в этом случае *продолжения* отраженных от зеркала лучей пересекаются в *побочном фокусе* выпуклого зеркала – точке f на расстоянии $F = \frac{R}{2}$ от поверхности зеркала (рис. 3.19, б).

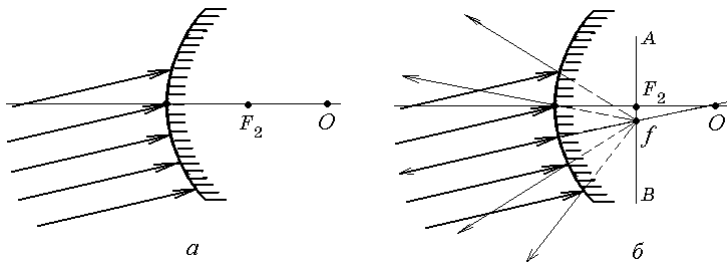


Рис. 3.19

Если рассматривать только лучи, составляющие небольшие углы с главной оптической осью, то можно приближенно считать, что все побочные фокусы выпуклого зеркала лежат в одной плоскости, перпендикулярной главной оптической оси и проходящей через главный фокус зеркала. Эта плоскость называется *фокальной плоскостью* выпуклого зеркала. На рис. 3.19, б фокальная плоскость показана отрезком AB .

Теперь приступим к решению нашей задачи.

1. Проведем луч 2, совпадающий с побочной оптической осью зеркала и параллельный лучу 1 (рис. 3.20, а). Так как продолжение луча 2 проходит через центр зеркала – точку O , отраженный луч 2' совпадает с падающим.

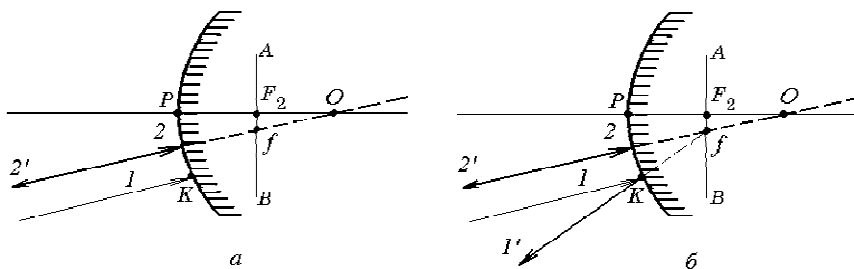


Рис. 3.20

2. Проведем фокальную плоскость AB . Тогда точка f – это побочный фокус. Все лучи, падающие на зеркало параллельно лучу 2, отражаются так, что *продолжения* отраженных лучей пересекаются в точке f . Следовательно, через побочный фокус f проходит и продолжение отраженного луча I' .

3. Проведем прямую через точку K и побочный фокус f , получим ход отраженного луча I' (рис. 3.20, б).

СТОП! Решите самостоятельно: В4, В5, В7.

Задача 3.5. Дана главная оптическая ось MN сферического зеркала, положение источника света S и его изображения S' (рис. 3.21). Найти построением полюс, главный фокус и центр зеркала.



Рис. 3.21

Решение.

1. Из рис. 3.21 видно, что источник и изображение расположены по *разные стороны* от главной оптической оси, значит, изображение *перевернутое*. Кроме того, точка S' расположена от главной оптической оси *дальше*, чем точка S , значит, изображение увеличенное. Из этого можно сделать вывод, что зеркало *вогнутое* и источник находится между оптическим центром и фокальной плоскостью.

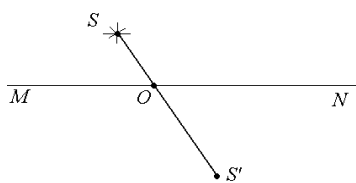


Рис. 3.22

2. Проведем через точки S и S' луч, на котором лежит и источник, и изображение – это луч, который при отражении от зеркала изменяет свое направление на противоположное, т.е. это луч, проходящий через центр зеркала – точку O . Тогда точка пересечения

отрезка SS' с прямой MN – это центр зеркала (рис. 3.22).

3. При отражении от полюса зеркала отраженный луч идет симметрично падающему относительно главной оптической оси (рис. 3.23). Значит, если пустить из точки S луч в полюс зеркала – точку P , то симметричная точке S точка A будет лежать на отраженном луче.

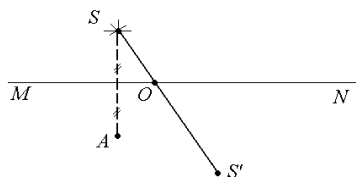


Рис. 3.23

4. Теперь заметим, что *любой* отраженный луч должен пройти через изображение – точку S' . Значит, у нас есть две точки, принадлежащие отраженному лучу: A и S' . Проведем через них прямую и получим отраженный луч. А точка пересечения отраженного луча с главной оптической осью дает нам полюс зеркала – точку P (рис. 3.24).

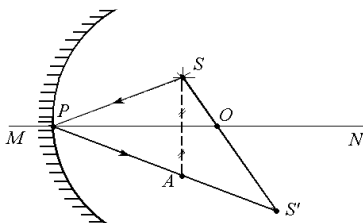


Рис. 3.24

5. Осталось найти фокус – точку F . Для этого пустим из точки S на зеркало луч SK , параллельный главной оптической оси. Отраженный луч должен, с одной стороны, пройти через изображение – точку S' , а с другой – пересечь главную оптическую ось в главном фокусе зеркала. Проведем отрезок KS' . Точка пересечения KS' с прямой MN – точка F – это и есть главный фокус зеркала (рис. 3.25).

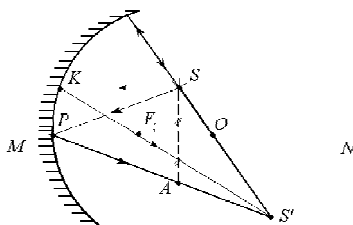


Рис. 3.25

СТОП! Решите самостоятельно: В8, С1–С3.

Формула сферического зеркала

Найдем связь между расстоянием d светящейся точки от зеркала, расстоянием f изображения этой точки от зеркала и радиусом R сферы, частью которой является зеркало. Рассмотрим сначала вогнутое зеркало (рис. 3.26).

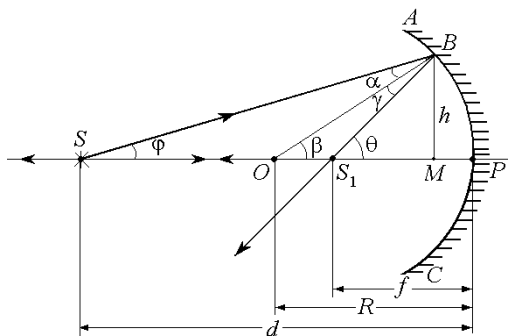


Рис. 3.26

Пусть светящаяся точка S расположена на главной оптической оси OP вогнутого зеркала. Из точки S на зеркало падает множество лучей, один из которых SP после отражения в точке P идет вдоль главной оси. Для этого луча угол падения, а следовательно, и угол отражения равен нулю, так как радиус OP является перпендикуляром (нормалью) к сферической поверхности. Построим ход произвольного луча SB , вышедшего из точки S и отразившегося от зеркала в точке B . Будем рассматривать лишь узкие, приосевые пучки лучей. Тогда точка B окажется на небольшом расстоянии h от главной оптической оси ($h \ll R$).

При выполнении этого условия падающий луч SB и отраженный луч BS_1 , а также радиус OB , проведенный в точку падения B , составляют с главной осью углы столь малые, что их синусы можно заменить тангенсами, а также самими углами, выраженными в радианах. В точке S_1 луч BS_1 пересечется с лучом PS_1 , отразившимся в полюсе зеркала. Если остальные лучи после отражения также пройдут через точку S_1 , то эта точка будет являться действительным изображением точки S .

Радиус OB перпендикулярен к отражающей поверхности. По закону отражения угол падения α равен углу отражения γ . Для треугольника SBO можно по теореме о внешнем угле треугольника записать:

$$\beta = \alpha + \varphi. \quad (1)$$

Точно так же для треугольника OBS_1 :

$$\theta = \beta + \gamma. \quad (2)$$

Учитывая, что $\gamma = \alpha$, из (2) получим

$$\theta = \beta + \alpha. \quad (3)$$

Найдем связь между углами γ , β и θ . Для этого выразим угол α из (1) и подставим в (3):

$$\begin{aligned} \alpha = \beta - \varphi &\Rightarrow \theta = \beta + (\beta - \varphi) \Rightarrow \\ \theta + \varphi &= 2\beta. \quad (4) \end{aligned}$$

Теперь рассмотрим прямоугольные треугольники SBM , OBM и S_1BM и выразим значения углов φ , β и θ через катеты этих треугольников:

$$\Delta SBM: \quad \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{h}{SM} \approx \frac{h}{d};$$

$$\Delta OBM: \quad \beta \approx \operatorname{tg} \beta = \frac{h}{OM} \approx \frac{h}{R};$$

$$\Delta S_1BM: \quad \theta \approx \operatorname{tg} \theta = \frac{h}{S_1M} \approx \frac{h}{f}.$$

Подставляя эти значения γ , β и θ в формулу (4), получим

$$\begin{aligned} \frac{h}{f} + \frac{h}{d} &= 2 \frac{h}{R} \Rightarrow \\ \frac{1}{f} + \frac{1}{d} &= \frac{2}{R}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Формула (3.2) называется *формулой сферического зеркала*.

Поскольку h не входит в формулу (3.2), то получается, что *любой* луч, вышедший из точки S и отразившийся от зеркала, пройдет через точку S_1 , т.е. точка S_1 является действительным изображением точки S .

Если в формуле (3.2) положить $d \rightarrow \infty$, т.е. источник бесконечно удаляется от зеркала, и лучи, падающие на зеркало, параллельны главной оптической оси (рис. 3.27, а), то из формулы (3.2) получим

$$\frac{1}{f} + \frac{1}{\infty} = \frac{2}{R} \Rightarrow f = \frac{R}{2}.$$

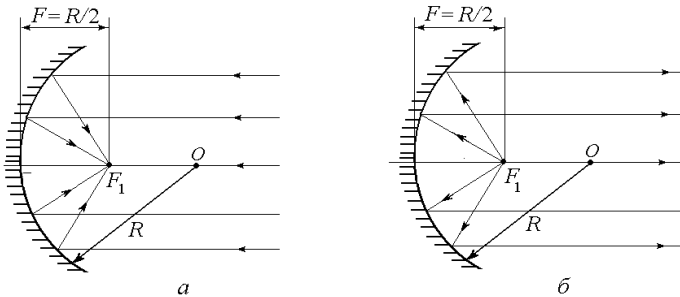


Рис. 3.27

Эта величина является *фокусным расстоянием* зеркала, т.е. расстоянием зеркала до главного фокуса, и обозначается буквой F :

$$F = \frac{R}{2}.$$

Другими словами, фокусное расстояние равно половине радиуса-са! Мы с вами теоретически обосновали формулу (3.1), которую в начале параграфа приняли к сведению как экспериментальный факт. С учетом того, что $F = R/2$, формула (3.2) имеет вид

$$\frac{1}{f} + \frac{1}{d} = \frac{1}{F}. \quad (3.3)$$

Из принципа обратимости световых лучей следует, что если в главном фокусе вогнутого зеркала расположить точечный источник, то лучи, выходящие из этого источника, после отражения от зеркала будут параллельны главной оптической оси (рис. 3.27, а).

А вот когда все вроде бы стало ясно, давайте посмотрим, как пойдут отраженные от вогнутого зеркала лучи в случае, показанном на рис. 3.27, б), если рассматривать не только малые, а *все* возможные углы, которые падающие лучи составляют с главной оптической осью.

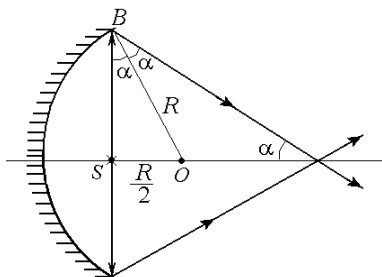


Рис. 3.28

Рассмотрим луч SB , падающий на зеркало из точки S , расположенной в главном фокусе (рис. 3.28). Луч SB составляет с главной оптической осью угол 90° . В прямоугольном $\triangle SBO$ катет $SO = R/2$, а гипотенуза $OB = R$, следовательно, $\angle SBO = \alpha$ лежит против катета, который в 2 раза меньше гипотенузы,

а значит, $\alpha = 30^\circ$. Тогда, как видно из рис. 3.28, отраженный луч BO вовсе *не параллелен* главной оптической оси, а пересекает ее под углом $\angle BS_1O = 90^\circ - 2 \cdot 30^\circ = 30^\circ$.

Читатель: Из формулы (3.3) следует, что $\frac{1}{f} = \frac{1}{F} - \frac{1}{d}$, значит, если

$d < F$, то $\frac{1}{F} < \frac{1}{d}$ и $\frac{1}{f} < 0$, т.е. $f < 0$. Что бы это значило?

Автор: Если $f < F$, значит, источник находится между фокальной плоскостью и зеркалом (см. рис. 3.12). В этом случае получится мнимое изображение, которое находится *за зеркалом*.

Для удобства дальнейших расчетов договоримся, что величину f в формуле (3.3) будем считать алгебраической. Если $f > 0$, то изображение действительное, а если $f < 0$ – изображение мнимое.

Задача 3.6. Вогнутое зеркало с радиусом кривизны $R = 1,0$ м дает мнимое изображение предмета, расположенное на расстоянии $3,0$ м от зеркала. На каком расстоянии d от зеркала находится предмет?

$$\left. \begin{array}{l} R = 1,0 \text{ м} \\ f = -3,0 \text{ м} \\ d = ? \end{array} \right| \begin{array}{l} \text{Решение. Поскольку изображение мнимое, то } f = \\ = -3,0 \text{ м} < 0. \\ \text{Воспользуемся формулой сферического зеркала} \end{array}$$

$$(3.3) \quad \frac{1}{f} + \frac{1}{d} = \frac{1}{F} \text{ и найдем } d:$$

$$\frac{1}{d} = \frac{1}{F} - \frac{1}{f} = \frac{2}{R} - \frac{1}{f} = \frac{2f - R}{Rf} \Rightarrow d = \frac{Rf}{2f - R} = \frac{(1,0 \text{ м}) \cdot (-3,0 \text{ м})}{2 \cdot (-3,0 \text{ м}) - (1,0 \text{ м})} \approx \\ \approx 0,43 \text{ м.}$$

$$\text{Ответ: } d = \frac{Rf}{2f - R} \approx 0,43 \text{ м.}$$

СТОП! Решите самостоятельно: А7, А8, В9, С4, С5, D1.

Читатель: А как быть, если зеркало выпуклое? Ведь формула (3.3) получена для вогнутого зеркала?

Автор: Когда зеркало выпуклое, то главный фокус расположен за зеркалом (рис. 3.29). Можно показать (мы это делать не будем), что формула сферического зеркала в этом случае также будет справедлива, если величину F в формуле (3.3) взять со знаком «минус». А это значит, что величину F в формуле (3.3) тоже следует рассматривать как величину алгебраическую:

1) если зеркало вогнутое, то

$$F = \frac{R}{2} > 0;$$

2) если зеркало выпуклое, то

$$F = -\frac{R}{2} < 0.$$

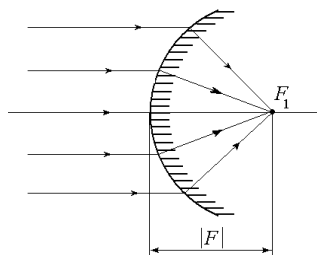


Рис. 3.29

Задача 3.7. Радиус кривизны выпуклого зеркала $R = 1,6$ м. На каком расстоянии d перед зеркалом должен находиться предмет, чтобы его изображение получилось в $n = 1,5$ раза ближе к зеркалу, чем сам предмет?

$$\begin{array}{l} R = 1,6 \text{ м} \\ n = 1,5 \\ \hline d = ? \end{array}$$

Решение. Изображение в выпуклом зеркале всегда мнимое (см. рис. 3.14), поэтому $f < 0$. Если d – это расстояние от зеркала до предмета, а $|f|$ – расстояние от зеркала до изображения, то согласно условию зада-

чи $\frac{d}{n} = |f|$, а с учетом того, что $f < 0$, получаем

$$\frac{d}{n} = -f \Rightarrow f = -\frac{d}{n}. \quad (1)$$

Формула зеркала в данном случае имеет вид

$$\frac{1}{f} + \frac{1}{d} = -\frac{2}{R}. \quad (2)$$

Подставим (1) в (2):

$$\begin{aligned} \frac{1}{(-d/n)} + \frac{1}{d} &= -\frac{2}{R} \Rightarrow -\frac{n}{d} + \frac{1}{d} = -\frac{2}{R} \Rightarrow \frac{1-n}{d} = -\frac{2}{R} \Rightarrow \\ d &= \frac{R(n-1)}{2} = \frac{1,6 \text{ м} \cdot (1,5-1)}{2} \approx 0,40 \text{ м}. \end{aligned}$$

Ответ: $d = \frac{R(n-1)}{2} \approx 0,40$ м.

СТОП! Решите самостоятельно: А9, А10, В10, С6, D2.

Мнимый источник

Читатель: Допустим, в вогнутом зеркале 1 получено действительное изображение (рис. 3.30). Если мы поставим второе сферическое зеркало (выпуклое или вогнутое) на пути *сходящихся* лучей, то, наверное, эти лучи, отразившись от второго зеркала, дадут изображение (действительное или мнимое). Как нам тогда узнать, где находится это изображение?

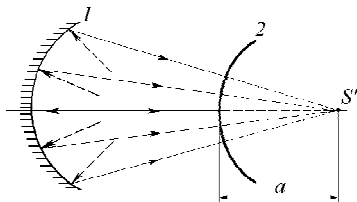


Рис. 3.30

Автор: Это случай так называемого мнимого источника. То есть за зеркалом 2 пересекаются *продолжения* падающих на него лучей. В этом случае тоже можно применять формулу сферического зеркала (3.3): $\frac{1}{f} + \frac{1}{d} = \frac{1}{F}$, только величину d здесь следует взять равной расстоянию от зеркала до мнимого источника со знаком «минус», т.е. $d = -a$ (см. рис. 3.30).

Теперь мы уже можем сформулировать «правило знаков» для сферического зеркала в самом общем случае. Итак: для любого сферического зеркала в любой ситуации справедливо

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

где $d > 0$, если источник действительный; $d < 0$, если источник мнимый; $f > 0$, если изображение действительное; $f < 0$, если изображение мнимое; $F = \frac{R}{2} > 0$, если зеркало вогнутое;

$F = -\frac{R}{2} < 0$, если зеркало выпуклое.

Задача 3.8. Сходящиеся лучи падают на выпуклое зеркало так, что их продолжения пересекаются в точке, находящейся на расстоянии 0,40 м за зеркалом. После отражения от зеркала лучи расходятся таким образом, что их продолжения пересекаются в точке, отстоящей от зеркала на расстоянии 1,6 м. Обе точки пересечения лежат на главной оптической оси зеркала. Найти фокусное расстояние F зеркала.

$d = -0,40 \text{ м}$ $f = -1,6 \text{ м}$ $F = ?$	<p>Решение. В данном случае мы имеем <i>мнимый источник</i>, поэтому $d < 0$, и <i>мнимое изображение</i>, поэтому $f < 0$.</p>
--	--

Найдем фокусное расстояние:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{f + d}{df} \Rightarrow F = \frac{df}{f + d} = \frac{(-0,40 \text{ м})(-1,6 \text{ м})}{(-0,40 - 1,6) \text{ м}} \approx -0,32 \text{ м}.$$

Ответ: $F = \frac{df}{f + d} \approx -0,32 \text{ м}.$

СТОП! Решите самостоятельно: A11, A12, B11, C7, D3.

Во сколько раз изображение больше источника?

Размеры изображения, полученного с помощью сферического зеркала, практически всегда не совпадают с размерами источника (см. рис. 3.11–3.14). Отношение линейного размера изображения H к линейному размеру источника h называется *линейным увеличением* и обозначается русской буквой Γ :

$$\Gamma = \frac{H}{h}. \quad (3.4)$$

Величина Γ может быть как больше, так и меньше 1. Если $\Gamma < 1$, величину Γ иногда называют линейным уменьшением.

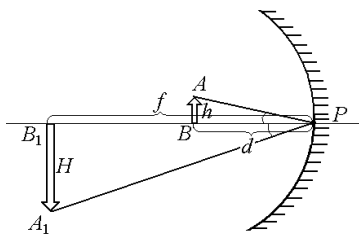


Рис. 3.31

Посмотрим, как связана величина Γ с величинами f и d . Рассмотрим рис. 3.31. Из подобия треугольников ABP и A_1B_1P следует, что $\frac{H}{h} = \frac{f}{d}$, следовательно, справедлива формула

$$\Gamma = \frac{f}{d}. \quad (3.5)$$

Читатель: А если $f < 0$ или $d < 0$?

Автор: В общем случае, как нетрудно доказать, справедлива более общая формула

$$\Gamma = \frac{|f|}{|d|}. \quad (3.6)$$

Задача 3.9. Вогнутое зеркало дает изображение предмета с увеличением $\Gamma = 6$. Найти радиус кривизны R зеркала, если предмет расположен на расстоянии $d = 21$ см от зеркала.

$$\Gamma = 6$$

$$d = 21 \text{ см}$$

$$R = ?$$

Решение. Вогнутое зеркало может давать как действительное ($f > 0$), так и мнимое ($f < 0$) изображения. Рассмотрим оба случая.

1. $f > 0$, тогда

$$\Gamma = \frac{|f|}{|d|}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{2}{R}. \quad (2)$$

Выразим f из (1), подставим в (2) и получим

$$f = \tilde{A}d \Rightarrow \frac{1}{\tilde{A}d} + \frac{1}{d} = \frac{2}{R} \Rightarrow \frac{\tilde{A}+1}{\tilde{A}d} = \frac{2}{R} \Rightarrow \frac{R}{2} = \frac{\tilde{A}d}{\tilde{A}+1} \Rightarrow$$

$$R = \frac{2\Gamma d}{\Gamma+1} = \frac{2 \cdot 6 \cdot 21 \text{ см}}{6+1} \approx 36 \text{ см.}$$

2. $f < 0$, тогда

$$\Gamma = \frac{|f|}{|d|} = -\frac{f}{d}, \quad (3)$$

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{2}{R}. \quad (4)$$

Выразим f из (3), подставим в (4) и получим

$$f = -\tilde{A}d \Rightarrow \frac{1}{-\tilde{A}d} + \frac{1}{d} = \frac{2}{R} \Rightarrow \frac{\tilde{A}-1}{\tilde{A}d} = \frac{2}{R} \Rightarrow \frac{R}{2} = \frac{\tilde{A}d}{\tilde{A}-1} \Rightarrow$$

$$R = \frac{2\Gamma d}{\Gamma-1} = \frac{2 \cdot 6 \cdot 21 \text{ см}}{6-1} \approx 50 \text{ см.}$$

Ответ: 1) $R = \frac{2\Gamma d}{\Gamma+1} \approx 36 \text{ см}$; 2) $R = \frac{2\Gamma d}{\Gamma-1} \approx 50 \text{ см}$.

СТОП! Решите самостоятельно: В12, В13, С8, D4.

Задача 3.10. Пламя свечи находится на расстоянии $d = 1,5 \text{ м}$ от выпуклого зеркала с фокусным расстоянием $F = -0,50 \text{ м}$. Найти уменьшение Γ изображения пламени свечи.

$d = 1,5 \text{ м}$ $F = -0,50 \text{ м}$ $\Gamma = ?$	<p>Решение. Выпуклое зеркало всегда дает мнимое изображение, если источник действительный. В самом деле, для выпуклого зеркала справедливо</p>
--	---

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = -\frac{2}{R}. \quad (1)$$

Если $d > 0$, то для того, чтобы равенство (1) выполнялось, необходимо, чтобы $f < 0$. Следовательно,

$$\Gamma = \frac{|f|}{d} = \frac{-f}{d} \Rightarrow f = -\Gamma d. \quad (2)$$

Перепишем равенство (1) в виде

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}, \quad (3)$$

где $F = -0,50 \text{ м} < 0$. Подставим (2) в (3), получим

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{-\tilde{A}d} = \frac{1}{F} \Rightarrow \frac{1}{\tilde{A}d} = \frac{1}{d} - \frac{1}{F} = \frac{F-d}{dF} \Rightarrow \tilde{A}d = \frac{dF}{F-d} \Rightarrow$$

$$\Gamma = \frac{F}{F-d} = \frac{-0,50 \text{ м}}{-0,50 \text{ м} - 1,5 \text{ м}} \approx 0,25.$$

Ответ: $\Gamma = \frac{F}{F-d} \approx 0,25$.

СТОП! Решите самостоятельно: В15, С9.

Задача 3.11. Вогнутое зеркало дает изображение предмета с увеличением $\Gamma = 2$. Найти радиус кривизны R зеркала, если расстояние между предметом и изображением $a = 18 \text{ см}$.

$$\begin{array}{l} \Gamma = 2 \\ a = 18 \text{ см} \\ R = ? \end{array}$$

Решение. Поскольку увеличенное изображение может быть как действительным, так и мнимым, рассмотрим оба случая.

1. Если изображение действительное (рис. 3.32), то $f > 0$. Из условия задачи следует

$$f = d + a, \quad (1)$$

формула зеркала

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{2}{R}. \quad (2)$$

Увеличение равно

$$\Gamma = \frac{f}{d} \Rightarrow f = \Gamma d. \quad (3)$$

Подставив (3) в (1), получим

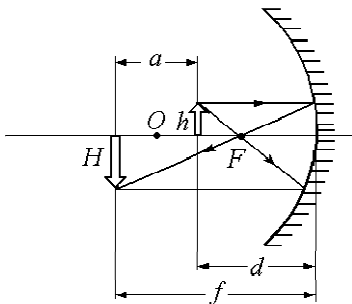


Рис. 3.32

$$\tilde{A}d = d + a \Rightarrow d(\tilde{A} - 1) = a \Rightarrow d = \frac{a}{\tilde{A} - 1}. \quad (4)$$

Тогда из (3) находим

$$f = \Gamma d = \frac{\Gamma a}{\Gamma - 1}. \quad (5)$$

Подставив (4) и (5) в (2), получим

$$\frac{1}{\dot{a}/(\tilde{A}-1)} + \frac{1}{\tilde{A}\dot{a}/(\tilde{A}-1)} = \frac{2}{R} \Rightarrow \frac{\tilde{A}-1}{\dot{a}} + \frac{\tilde{A}-1}{\tilde{A}\dot{a}} = \frac{2}{R} \Rightarrow$$

$$\frac{\tilde{A}-1}{\dot{a}} \left(1 + \frac{1}{\tilde{A}}\right) = \frac{2}{R} \Rightarrow \frac{(\tilde{A}-1)(\tilde{A}+1)}{\tilde{A}\dot{a}} = \frac{2}{R} \Rightarrow R = \frac{2\tilde{A}\dot{a}}{\tilde{A}^2-1} \Rightarrow$$

$$R = \frac{2\tilde{A}\dot{a}}{\tilde{A}^2-1} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 18}{2^2-1} \approx 24 \text{ см.}$$

2. Если изображение мнимое (рис. 3.33), то $f < 0$. Из условия задачи следует $|f| + d = a$, а поскольку $f < 0$, то $|f| = -f$, и последнее равенство примет вид

$$-f + d = a, \quad (1)$$

формула зеркала:

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

Увеличение равно

$$\Gamma = \frac{|f|}{d} \Rightarrow \frac{-f}{d} \Rightarrow f = -\Gamma d. \quad (3)$$

Подставив (3) в (1), получим

$$-(-\tilde{A}d) + d = a \Rightarrow d\tilde{A} + d = a \Rightarrow d(\tilde{A}+1) = \dot{a} \Rightarrow d = \frac{\dot{a}}{\tilde{A}+1}. \quad (4)$$

Подставив (4) в (3), находим

$$f = -\Gamma d = -\frac{\Gamma a}{\tilde{A}+1}. \quad (5)$$

Подставив (4) и (5) в (2), получим

$$-\frac{\tilde{A}+1}{\tilde{A}\dot{a}} + \frac{\tilde{A}+1}{\dot{a}} = \frac{2}{R} \Rightarrow \frac{\tilde{A}+1}{\dot{a}} \left(-\frac{1}{\tilde{A}} + 1\right) = \frac{2}{R} \Rightarrow \frac{\tilde{A}+1}{\dot{a}} \cdot \frac{\tilde{A}-1}{\tilde{A}} = \frac{2}{R} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{\tilde{A}^2-1}{\tilde{A}\dot{a}} = \frac{2}{R} \Rightarrow R = \frac{2\tilde{A}\dot{a}}{\tilde{A}^2-1} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 18}{2^2-1} \approx 24 \text{ см.}$$

Как видим, в обоих случаях получился один и тот же результат.

$$\text{Ответ: } R = \frac{2\Gamma a}{\Gamma^2-1} \approx 24 \text{ см.}$$

СТОП! Решите самостоятельно: В16, С10–С12, D5.

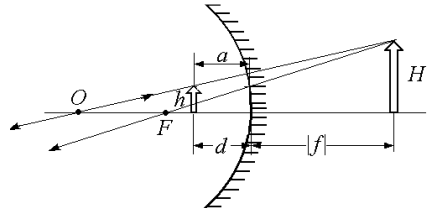


Рис. 3.33

Область наблюдения предмета в выпуклом зеркале

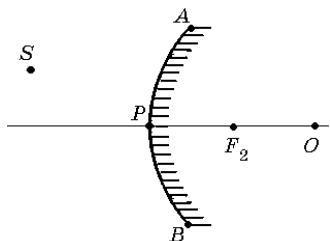


Рис. 3.34

Задача 3.12. Укажите на рисунке область, из которой можно видеть изображение точки S в выпуклом зеркале (рис. 3.34). Главный фокус и центр зеркала заданы.

Решение. 1. Построим изображение точки S . Для этого пустим на зеркало два луча: луч 1 , параллельный главной оптической оси, и луч 2 , продолжение которого проходит через центр зеркала – точку O (рис. 3.35).

Тогда продолжение отраженного луча $1'$ проходит через главный фокус зеркала – точку F_2 , а отраженный луч $2'$ совпадает с падающим лучом 2 . Пересечение продолжений отраженных лучей $1'$ и $2'$ дают изображение точки S – точку S' .

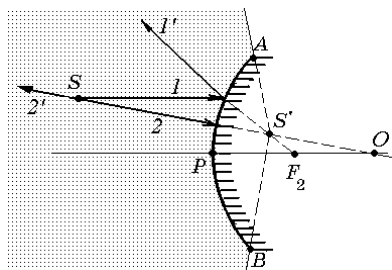


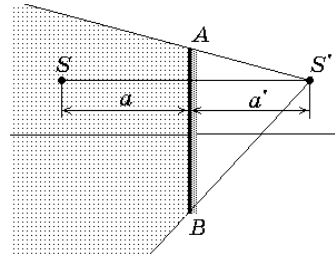
Рис. 3.35

2. Область наблюдения изображения – это область, в которую попадают лучи, исходящие от источника и отраженные от зеркала. Чтобы получить область наблюдения на рисунке, надо провести прямые из точки S' через края зеркала – точки A и B . Тогда область, ограниченная самим зеркалом и прямыми $S'A$ и $S'B$, и является областью, из которой можно наблюдать мнимое изображение – точку S' .

Заметим, что область наблюдения предмета в выпуклом зеркале *больше*, чем область наблюдения того же предмета в плоском зеркале.

Чтобы было понятно, почему это так, покажем область наблюдения изображения точки S , находящейся на таком же расстоянии от *плоского* зеркала, на каком находится точка S от *выпуклого* зеркала на рис. 3.34. Построение показано на рис. 3.36.

Из рисунка видно, что область наблюдения в плоском зеркале гораздо уже, чем в выпуклом. Объясняется это тем, что в выпуклом зеркале мнимое изображение находится *очень близко к зеркалу* – не дальше его фокальной плоскости. В плоском зеркале расстояние от плоскости зеркала до мнимого изображения равно, как мы знаем, расстоянию от зеркала до предмета: $a = a'$.



Задача 3.13. Светящаяся точка находится на главной оптической оси вогнутого зеркала на одинаковых расстояниях от зеркала и его фокуса. Перпендикулярно к оси зеркала расположен экран, центр которого совпадает с оптическим центром зеркала. Во сколько раз диаметр светлого круга на экране превышает диаметр зеркала?

$d = F/2$ | **Решение.** Светлый круг на экране получается из-за
 $L/l = ?$ | отражения лучей зеркалом (рис. 3.37). Так как светящаяся точка S расположена к зеркалу ближе фокуса, то она дает *мнимое* изображение S' , а лучи, падающие на экран, можно считать исходящими из мнимого изображения S' точки S . Изображение мнимое, поэтому $f < 0$.

Воспользуемся формулой зеркала $\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$, где $d = \frac{F}{2}$, получим

$$\frac{1}{F/2} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{F} - \frac{2}{F} = -\frac{1}{F} \Rightarrow f = -F < 0,$$

соответственно $|f| = F$ (см. рис. 3.37).

Рассмотрим подобные треугольники $S'AB$ и $S'CD$. Из их подобия следует

$$\frac{L}{l} = \frac{CD}{AB} = \frac{S'P}{S'O}. \quad (1)$$

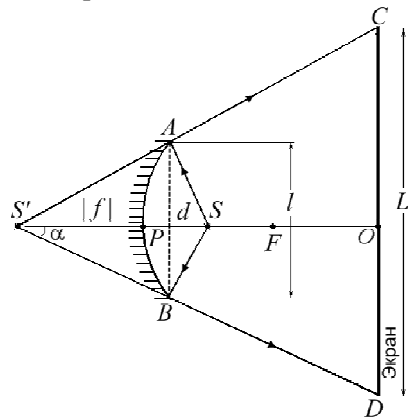


Рис. 3.37

(Мы считаем лучи SC и SD параксиальными, поэтому точку P можно приближенно считать лежащей на отрезке AB .)

Поскольку по условию задачи O – центр зеркала, то $PO = R = 2F$. Как видно из рис. 3.37, $SP = |f| = F$, тогда

$$S'O = SP + PO = F + 2F = 3F.$$

Подставляя значения $S'O$ и SP в (1), получим

$$\frac{L}{l} = \frac{S'P}{S'O} = \frac{3F}{F} = 3.$$

Ответ: $\frac{L}{l} = 3$.

СТОП! Решите самостоятельно: С14–С16, D6.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Задачи легкие

A1. Как в солнечный день определить приблизительно радиус кривизны вогнутого зеркала?

A2. Постройте дальнейший ход луча, падающего на вогнутое зеркало (рис. 3.38).

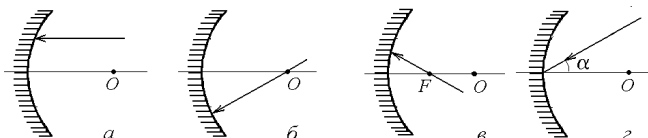


Рис. 3.38

A3. Постройте изображения предметов в вогнутом зеркале (рис. 3.39).

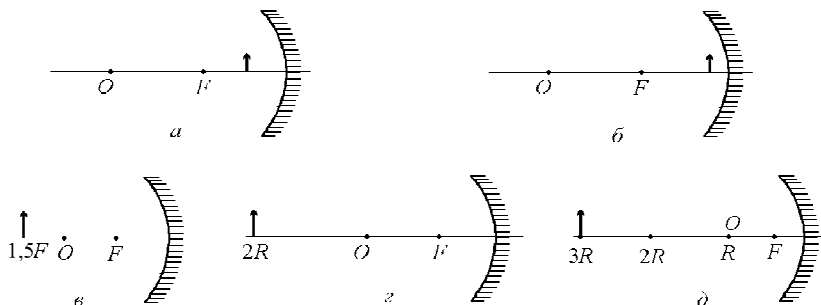


Рис. 3.39

A4. Фокусное расстояние вогнутого зеркала 30 см. Где будет расположено изображение свечи, находящейся от зеркала на расстоянии 60 см. (Решить задачу построением.)

A5. Постройте дальнейший ход луча, падающего на выпуклое зеркало (рис 3.40).

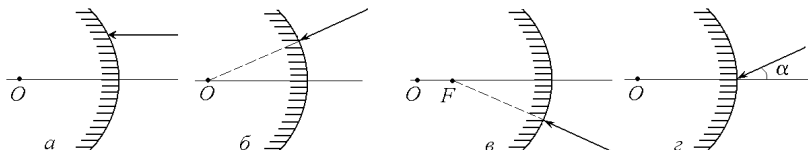


Рис. 3.40

A6. Постройте изображение предмета в выпуклом зеркале (рис. 3.41).

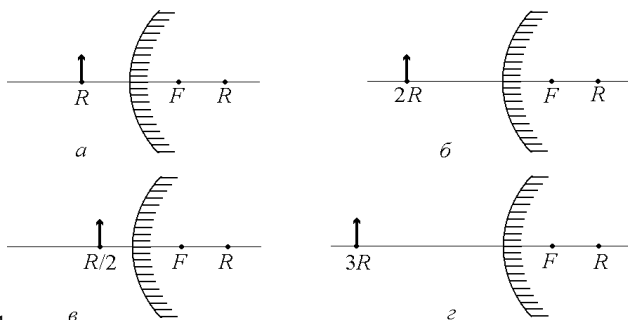


Рис. 3.41

A7. Расстояние от предмета до вогнутого зеркала $d = 0,5$ м, расстояние от зеркала до изображения $f = 2$ м. Найти радиус кривизны R зеркала.

A8. Расстояние от точечного источника света до вогнутого зеркала $d = 2R$, где R – радиус кривизны зеркала. Источник находится на главной оптической оси зеркала. Где расположено его изображение? Построить ход лучей.

A9. Предмет находится на расстоянии $d = 5,0$ м от выпуклого зеркала с радиусом кривизны $R = 1,5$ м. На каком расстоянии f от зеркала находится изображение предмета? Какое это изображение?

A10. Изображение источника света получено с помощью выпуклого зеркала на расстоянии 60 см от зеркала. На каком расстоянии d от зеркала расположен источник, если фокусное расстояние зеркала $F = -90$ см?

A11. Сходящиеся лучи падают на вогнутое зеркало с радиусом кривизны $R = 60$ см так, что их продолжения пересекаются на оси зеркала в точке S на расстоянии $a = 15$ см за зеркалом. На каком расстоянии от зеркала сойдутся эти лучи после отражения от зеркала? Будет ли точка их пересечения действительной?

A12. Вогнутое зеркало поставлено против сходящегося пучка лучей так, что точка, где лучи пересекались, осталась за зеркалом на расстоянии 20 см от его полюса. Отраженные от зеркала лучи сошлись в одну точку на расстоянии, равном $1/5$ фокусного расстояния зеркала. Найти радиус кривизны зеркала.

Задачи средней трудности

B1. Лампочка, установленная в автомобильной фаре, имеет две нити накала, питаемые независимо друг от друга. Нить накала, дающая «дальний свет», помещена в фокусе вогнутого зеркала, а нить накала, дающая «ближний свет», расположена ближе к зеркалу и чуть выше первой. Чем отличаются пучки «дальнего» и «ближнего света»? Ответ поясните построением.

B2. Изобразите отраженный луч по данному падающему лучу на вогнутое зеркало (рис. 3.42).

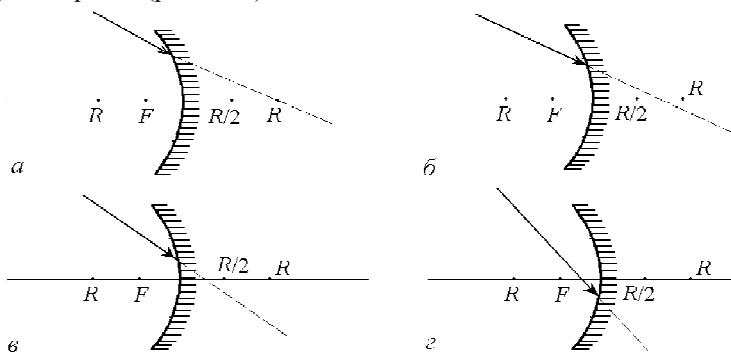


Рис. 3.42

B3. Постройте изображение точки, лежащей на главной оптической оси вогнутого зеркала (рис. 3.43).

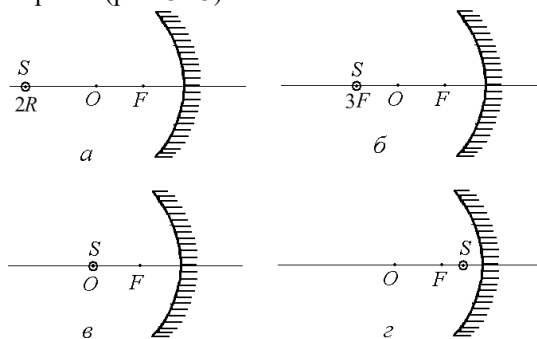


Рис. 3.43

В4. Изобразите отраженный луч по данному падающему лучу на выпуклое зеркало (рис. 3.44).

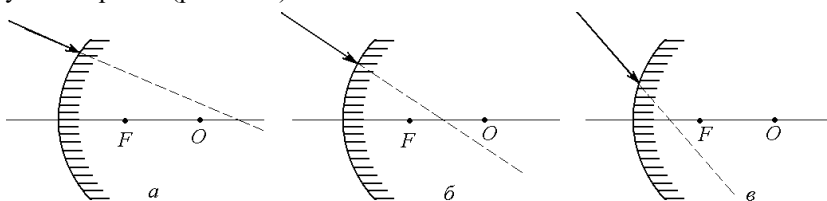


Рис. 3.44

В5. Постройте изображение точечного источника света, находящегося на главной оптической оси выпуклого зеркала (рис. 3.45).

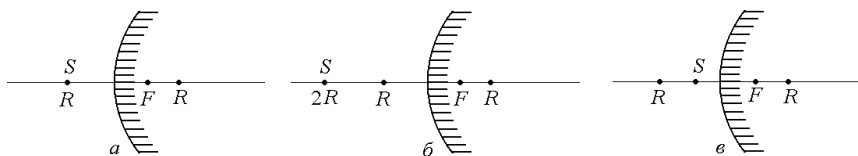


Рис. 3.45

В6. Если поверхность воды колеблется, то изображения предметов в воде принимают причудливые формы. Почему?

В7. На рис. 3.46, *а* изображен отраженный луч от вогнутого зеркала, а на рис. 3.46, *б* от выпуклого зеркала. Найдите построением падающие лучи. *O* – центр зеркала, *P* – его полюс.

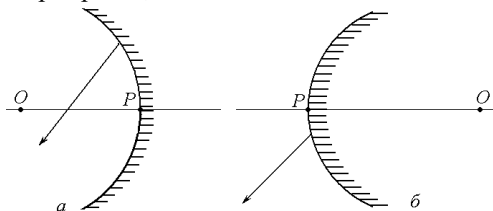


Рис. 3.46

В8. В ящике, открытом справа, находится сферическое зеркало. На рис. 3.47 показан ход лучей, падающих на зеркало и отраженных от него. Найдите построением положение полюса, оптического центра и фокуса зеркала. Какое это зеркало — выпуклое или вогнутое?

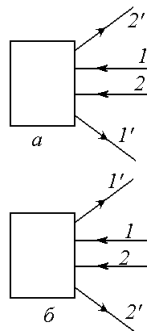


Рис. 3.47

В9. В зеркальном гальванометре для отсчета углов поворота на нити было подвешено небольшое вогнутое зеркало *L* (рис. 3.48). На расстоянии $l = 1,0$ м от зеркала помещена шкала AA_1 и непосредственно под ней –

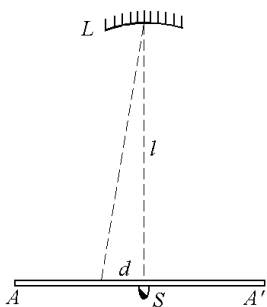


Рис. 3.48

осветитель S . Каким должно быть фокусное расстояние зеркала, чтобы на шкале получилось действительное изображение отверстия осветителя? На какое расстояние x переместится изображение по шкале, если зеркало повернется на малый угол φ ?

В10. Светящаяся точка расположена на расстоянии $d = 1$ м от выпуклого зеркала, а ее изображение делит точно пополам отрезок главной оптической оси между полюсом зеркала и его фокусом. Найти радиус кривизны R зеркала.

В11. Сходящиеся лучи падают на выпуклое зеркало с радиусом кривизны $R = 60$ см так, что их продолжения пересекаются на оси зеркала на расстоянии $a = 15$ см за зеркалом. На каком расстоянии от зеркала сойдутся эти лучи после отражения? Будет ли точка их пересечения действительной? Решить ту же задачу для $R = 60$ см и $a = 40$ см.

В12. Радиус кривизны вогнутого зеркала 80 см. На каком расстоянии от зеркала нужно поместить предмет, чтобы его действительное изображение было вдвое больше предмета?

В13. Малый участок поверхности сферы посеребрен. На диаметрально противоположной стороне сферы получилось изображение некоторого предмета, помещенного внутри нее. С каким увеличением Γ изображается предмет?

В14. На каком расстоянии перед выпуклым сферическим зеркалом должен находиться предмет, чтобы его изображение получилось в 1,5 раза ближе к зеркалу, чем сам предмет. Радиус кривизны зеркала 1,6 м. Построить изображение предмета.

В15. Выпуклое зеркало с фокусным расстоянием $F = -0,2$ м дает мнимое изображение предмета с уменьшением $\Gamma = 1/2$. На каком расстоянии d от зеркала расположен предмет? Построить ход лучей.

В16. Вогнутое сферическое зеркало дает действительное изображение, которое в три раза больше предмета. Определить фокусное расстояние зеркала, если расстояние между предметом и его изображением $l = 20$ см.

В17. Выпуклые зеркала сильно искажают форму предметов. Почему же на автобусах, троллейбусах, автомобилях устанавливают не плоские, а именно выпуклые зеркала?

В18. Заштрихуйте на чертеже область, из которой можно видеть изображение точечного источника в выпуклом зеркале (рис. 3.49).

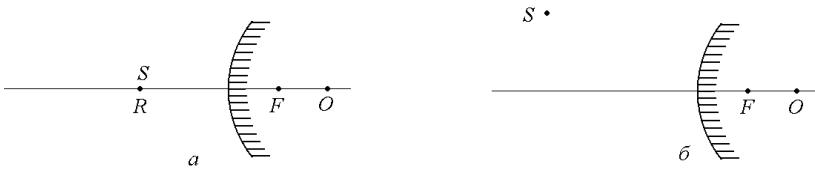


Рис. 3.49

Задачи трудные

С1. На рис. 3.50 SO – предмет, $S'O'$ – его мнимое изображение в зеркале, OO' – главная оптическая ось зеркала. Найти построением положение полюса зеркала, его оптического центра и фокуса.

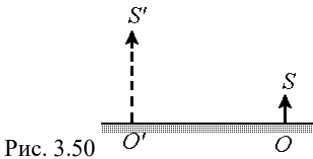


Рис. 3.50

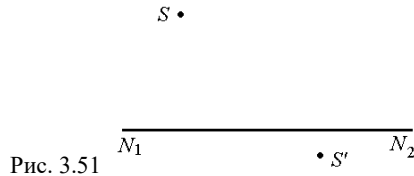


Рис. 3.51

С2. Точка S' есть изображение точечного источника света в сферическом зеркале, оптическая ось которого N_1N_2 (рис. 3.51). Найти построением положение центра зеркала и его фокуса.

С3. Дано положение главной оптической оси N_1N_2 сферического зеркала, расположение источника и изображения (рис. 3.52). Найти построением положения центра зеркала, его фокуса и полюса для случаев:

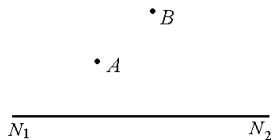


Рис. 3.52

- 1) A – источник, B – изображение;
- 2) B – источник, A – изображение.

С4. Внутренняя поверхность стенок шара зеркальна. Радиус шара $R = 36$ см. На расстоянии $R/2$ от центра шара помещен точечный источник S , посылающий свет к наиболее удаленной части шара. Где будет находиться изображение источника, возникающее после двух отражений: от дальней и ближней стенок шара? Как изменится положение изображения, если источник посылает свет к ближней стенке?

С5. Найти главное фокусное расстояние зеркала, если светящаяся точка и ее изображение лежат на главной оптической оси вогнутого зеркала на расстояниях 16 и 100 см соответственно от главного фокуса.

С6. Человек смотрит в посеребренный стеклянный шар диаметром $l = 0,60$ м, находясь от него на расстоянии $d = 0,25$ м. На каком расстоянии a от человека расположено его уменьшенное мнимое прямое изображение?

С7. Выпуклое зеркало с фокусным расстоянием $F = -1,45$ м закрывает собой отверстие в непрозрачном экране. Сходящиеся лучи падают на зеркало так, что после отражения они сходятся на главной оптической оси зеркала на расстоянии $f = 55$ см перед экраном. На каком расстоянии d за экраном сойдутся лучи, если вынуть зеркало из отверстия?

С8. Светящаяся точка расположена на расстоянии $d = 0,75$ м от вогнутого зеркала и на расстоянии $l = 0,05$ м от главной оптической оси зеркала. Изображение точки находится на расстоянии $L = 0,2$ м от оси. Найти радиус кривизны R зеркала в случаях, когда изображение действительное и мнимое.

С9. Чему равна величина изображения Солнца в подшипниковом шарике диаметром 4,0 мм? Диаметр Солнца $1,4 \cdot 10^6$ км, а расстояние до него $150 \cdot 10^6$ км?

С10. Вогнутое зеркало дает действительное изображение предмета с увеличением $\Gamma_1 = 5$. Если переместить предмет на некоторое расстояние вдоль главной оптической оси, изображение переместится вдоль оси на такое же расстояние. Найти увеличение Γ_2 при новом расположении предмета.

С11. Вогнутое зеркало дает действительное изображение предмета с увеличением $\Gamma_1 = 5,0$. Если зеркало переместить на расстояние $a = 2,0$ см ближе к предмету, то увеличение предмета станет $\Gamma_2 = 7,0$. Найти фокусное расстояние F зеркала.

С12. Каким должен быть радиус вогнутого зеркала, чтобы человек, глядящий в него, видел свое лицо на расстоянии 25 см с увеличением $\Gamma = 1,5$?

С13. Заштрихуйте на чертеже область, из которой можно видеть изображение предмета в выпуклом зеркале (рис. 3.53).

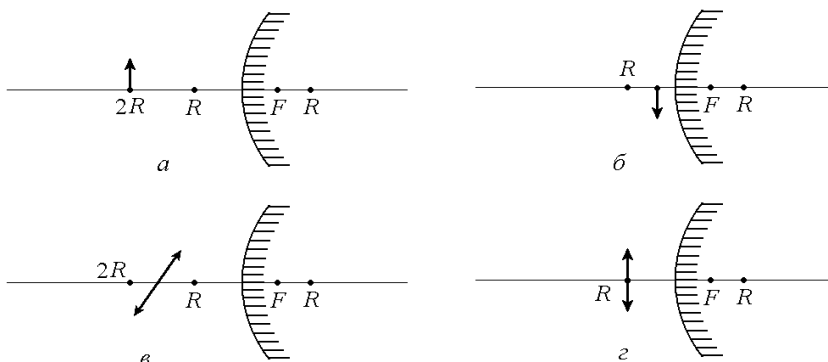


Рис. 3.53

С14. Через круглое отверстие в экране, имеющее диаметр $d = 4,0$ см, на выпуклое зеркало, находящееся на расстоянии $a = 16$ см от экрана, падает параллельный пучок света (вдоль главной оптической оси зеркала перпендикулярно к экрану). Отразившись от зеркала, пучок света, попадая на тот же экран, образует вокруг отверстия светлое пятно диаметром $D = 6,0$ см. Найти радиус кривизны зеркала.

С15. Пучок лучей от бесконечно удаленного источника света падает на экран, имеющий отверстие диаметром $d = 7$ см. Плоскость экрана перпендикулярна к лучам. На расстоянии $a = 68$ см за экраном расположено вогнутое зеркало с фокусным расстоянием $F = 0,28$ м, главная оптическая ось которого совпадает с осью пучка. Найти диаметр D светлого круга на экране.

С16. Перед круглым выпуклым зеркалом помещен на расстоянии $b = 5$ см экран S так, как показано на рис. 3.54. На расстоянии $a = 5$ см от экрана находится предмет KP высотой $h = 3$ см. При каких положениях глаза наблюдатель увидит изображение всего предмета? Каковы наибольшие размеры предмета (при заданном расположении предмета, зеркала и экрана), при которых зеркало будет давать изображение всего предмета? Диаметр зеркала $d = 10$ см.

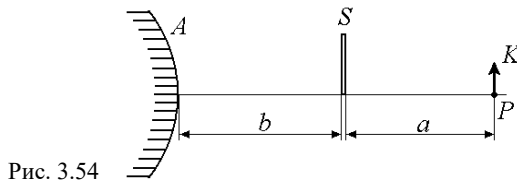


Рис. 3.54

Задачи очень трудные

D1. 1) В центре сферического зеркала радиусом r поместили точечный источник света S и, разрезав зеркало пополам по горизонтали, отодвинули верхнюю его половину на расстояние r вдоль главной оптической оси (рис. 3.55). Найти расстояние между изображениями источника света.

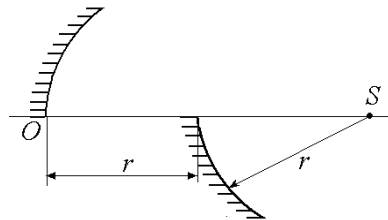


Рис. 3.55

2) В центре сферического зеркала расположен точечный источник света S . Зеркало разрезали пополам. Обе половины симметрично отодвинули на расстояние h от главной оптической оси целого зеркала. Найти расстояние между изображениями источника света в зеркалах.

D2. Перед выпуклым зеркалом помещена плоская тонкая стеклянная пластинка. На каком расстоянии b от пластинки (рис. 3.56) следует поместить точечный источник света S , чтобы его изображение, даваемое лучами, отраженными от передней поверхности пластинки, совпало с изображением, даваемым лучами, отраженными от зеркала? Фокусное расстояние зеркала $F = 20$ см, расстояние от пластинки до зеркала $a = 5,0$ см. Как можно установить совпадение изображений непосредственным наблюдением?

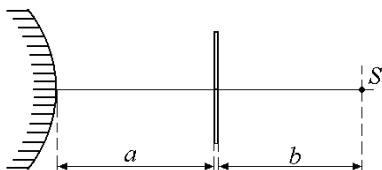


Рис. 3.56

D3. Луч пересекает главную оптическую ось выпуклого зеркала в некоторой точке A . На каком расстоянии от точки A необходимо расположить зеркало, чтобы луч, отразившись от него, пересек главную оптическую ось в точке B , отстоящей от точки A на расстоянии $l = 1,5 F$?

D4. Сходящиеся лучи падают на вогнутое зеркало с фокусным расстоянием $F = 0,50$ м и после отражения собираются в точке, отстоящей на расстоянии $f = 0,20$ м от зеркала и на расстоянии $L = 0,15$ м от его главной оптической оси. На каком расстоянии l от оси соберутся лучи, если убрать зеркало? Построить ход лучей.

D5. Фокус вогнутого зеркала расположен на расстоянии $a = 0,24$ м от предмета и на расстоянии $b = 0,54$ м от его изображения. Найти увеличение Γ предмета, даваемое зеркалом.

D6. В фокусе сферического зеркала прожектора помещен источник света в виде светящегося диска радиусом $r = 1,0$ см. Найти диаметр освещенного пятна на стене на расстоянии 50 м от прожектора, если фокусное расстояние сферического зеркала $F = 40$ см, а диаметр зеркала 1,0 м.