Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

А. Черноуцан, Законы отражения и преломления света, *Квант*, 2019, номер 1, 42–49

DOI: <https://doi.org/10.4213/kvant20190106>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 35.173.219.149

26 апреля 2023 г., 05:10:53

Законы отражения и преломления света

А. ЧЕРНОУЦАН

ПРИ ПАДЕНИИ ЛУЧА СВЕТА НА ЗЕРКАЛЬНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ происходит его отражение, т.е. возникает отраженный луч. Плоскость, проходящую через падающий луч и нормаль к поверхности в точке его падения, называют *плоскостью падения*, угол между падающим лучом и нормалью – *углом падения*, а угол между нормалью и отраженным

Рис. 1

лучом – *углом отражения*. Закон отражения утверждает, что а) отраженный луч лежит в плоскости падения и б) угол отражения γ равен углу падения α (рис.1).

Лучи, отраженные от плоского зеркала, образуют *мнимое изображение* любого точечного источника, расположенное по дру-

Рис. 2

гую сторону зеркала (в Зазеркалье) симметрично источнику (рис.2,а). Изображение формируется всеми отраженными лучами, а не узким пучком (в отличие от сферического зеркала, преломляющей поверхности, линзы).

Вопрос. Может ли плоское зеркало сформировать действительное изображение?

Ответ. Да, может, если на зеркало падает сходящийся пучок лучей (рис.2,б), идущих не непосредственно от источника, а после прохождения ими собирающей линзы. Падающие лучи образуют для зеркала *мнимый источник*, изображение которого будет действительным.

Если падение света происходит из среды с показателем преломления n_1 на границу со

Рис. 3

средой, имеющей показатель преломления n_2 , то образуются два луча: отраженный, возвращающийся в первую среду, и преломленный, распространяющийся во второй среде (рис.3). Отраженный луч подчиняется закону отражения: $\gamma = \alpha_1$. Закон преломления утверждает, что а) преломленный луч также лежит в плоскости падения и б) угол преломления α_2 (угол между преломленным лучом и нормалью) может быть найден из закона Снеллиуса

$$\frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1} = \frac{n_1}{n_2}.$$

Отметим, что при использовании *относительного показателя преломления*, равного отношению большего показателя преломления к меньшему, переход из оптически менее плотной среды в оптически более плотную ($n_1 < n_2$) эквивалентен переходу из вакуума ($n = 1$) в среду с относительным показателем преломления $n = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$:

$$\frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1} = \frac{1}{n},$$

а переход из оптически более плотной среды в оптически менее плотную ($n_1 > n_2$) – выходу луча из среды с относительным показателем преломления $n = \frac{n_1}{n_2} = n_{12}$ в вакуум:

$$\frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1} = n.$$

Задачи на законы отражения и преломления, выбранные нами для разбора, можно условно разделить на три группы: задачи на определение хода лучей с использованием геометрии и тригонометрии, задачи на пре-

дельный угол полного отражения и задачи на нахождение изображений.

Начнем с задач на закон отражения.

Задача 1. Под каким углом (в градусах) к горизонту следует расположить плоское зеркало, чтобы осветить дно вертикального колодца отраженными от зеркала солнечными лучами, падающими под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту?

Решение. Чтобы найти расположение зеркала, удобно начать с построения нормали. Угол между падающими и отраженными лучами равен $90^\circ + \alpha$, а нормаль проходит по биссектрисе этого угла. Следовательно, угол между нормалью и вертикалью равен $45^\circ + \alpha/2 = 60^\circ$. Такой же угол будет между зеркалом и горизонталью (угол получается из предыдущего поворотом на 90°).

Задача 2. При повороте плоского зеркала на некоторый угол вокруг оси, проходящей через точку падения луча перпендикулярно плоскости, в которой лежат падающий и отраженный лучи, угол между падающим и отраженным лучами увеличился на 40° . На какой угол (в градусах) было повернуто зеркало?

Решение. Здесь опять удобно отталкиваться от направления нормали. Если зеркало повернулось на угол α , то нормаль также повернулась на угол α . Так как падающий луч не меняет своего расположения, то угол падения изменится на $\pm\alpha$. На столько же изменится и угол отражения. Значит, угол между падающим и отраженным лучами изменился на $\beta = \pm 2\alpha$. По условию $\beta = 40^\circ$ (на столько повернулся отраженный луч). Следовательно, $\alpha = 20^\circ$.

Задача 3. Человек стоит перед плоским зеркалом, укрепленным на вертикальной стене. Какова должна быть минимальная высота (в см) зеркала, чтобы человек мог видеть себя в полный рост? Рост человека 180 см.

Решение. Человек должен видеть свою верхнюю точку и свою нижнюю точку. На рисунке 4,а человек упрощенно представлен вертикальным отрезком с глазом. Луч, идущий от верхней точки человека и попадающий в глаз, должен отразиться от зеркала в точке А, лежащей посередине между верхней точкой и глазом. Аналогично, луч, идущий от нижней точки человека и попадающий в глаз, должен отразиться в точке В,

Рис. 4

лежащей посередине между нижней точкой и глазом. Чтобы человек видел себя целиком, зеркало должно простирается от А до В, т.е. иметь вертикальную длину, равную половине роста человека. Значит, минимальная высота зеркала 90 см.

Этот результат становится еще более наглядным, если использовать понятие изображения. Глаз человека должен видеть через зеркало изображение человека, расположенное за зеркалом симметрично человеку (рис.4,б). Из построения видно, что вертикальный размер зеркального «окошка» для разглядывания изображения должен быть равен половине роста человека.

Задача 4. Два плоских зеркала располагаются под углом друг к другу и между ними помещается точечный источник света. Расстояние от этого источника до одного зеркала $l_1 = 3$ см, до другого $l_2 = 8$ см. Расстояние между первыми изображениями в зеркалах $L = 14$ см. Найдите угол α (в градусах) между зеркалами.

Решение. Строим изображение в каждом зеркале (рис.5). Треугольник, образован-

Рис. 5

ный источником и двумя изображениями, имеет стороны $2l_1$, $2l_2$ и L . Найдём угол β из теоремы косинусов:

$$L^2 = (2l_1)^2 + (2l_2)^2 - 2(2l_1)(2l_2)\cos\beta,$$

откуда

$$\cos\beta = 0,5, \quad \beta = 60^\circ.$$

Для угла между зеркалами получаем

$$\alpha = 180^\circ - \beta = 120^\circ.$$

Теперь – несколько задач на закон преломления.

Задача 5 (ЕГЭ). На рисунке 6 дан ход луча, полученный при исследовании прохождения луча через плоскопараллельную пластину. Чему равен показатель преломления материала пластины n на основе этих данных?

Рис. 6

Рис. 7

Решение. Запишем закон преломления (рис.7):

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n.$$

Выразим синусы углов из рисунка:

$$\sin \alpha = \frac{AD}{AB}, \sin \beta = \frac{CE}{BC}.$$

Из рисунка видно, что $AB = BC$. Следовательно,

$$n = \frac{AD}{CE} = \frac{3}{2} = 1,5.$$

Задача 6. Солнце составляет с горизонтом угол δ , синус которого 0,6. Шест высотой $H = 170$ см вбит в дно водоема глубиной $h = 80$ см. Найдите длину L тени от этого шеста на дне водоема, если показатель преломления воды $n = 4/3$.

Решение. Угол падения лучей $\alpha = 90^\circ - \delta$ (рис.8). При этом $\cos \alpha = \sin \delta = 0,6$, $\sin \alpha =$

Рис. 8

$= 0,8$. Угол преломления β найдем из закона преломления:

$$\sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n} = 0,6, \cos \beta = 0,8.$$

Теперь можно вычислить длину тени, которая определяется ходом луча, касающегося верхней точки шеста:

$$L = L_1 + L_2 = (H - h) \operatorname{tg} \alpha + h \operatorname{tg} \beta = 180 \text{ см.}$$

Задача 7. Луч света падает на прозрачную пластинку толщиной $d = 2$ см под углом α , синус которого 0,8. На сколько миллиметров сместится луч при прохождении пластинки? Показатель преломления вещества пластинки $n = 4/3$.

Решение. После выхода из пластинки в точке B (рис.9) луч пойдет параллельно

Рис. 9

своему начальному направлению. Смещением луча естественно считать расстояние x между линией падающего луча и линией прошедшего луча. Угол преломления найдем из закона преломления:

$$\sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n} = 0,6.$$

Расстояние x между лучами можно найти из треугольника ABE:

$$x = AB \sin(\alpha - \beta).$$

Но $AB = d / \cos \beta$, следовательно,

$$x = \frac{d \sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta} = \frac{d (\sin \alpha \cos \beta - \cos \alpha \sin \beta)}{\cos \beta} = 7 \text{ мм.}$$

К такому же результату можно прийти через треугольник BCE:

$$x = BC \cos \alpha,$$

$$\text{где } BC = CD - BD = d \operatorname{tg} \alpha - d \operatorname{tg} \beta.$$

Особое место в теме «преломление света» занимают задачи на использование предель-

ного угла. Обычно его называют предельным углом полного (внутреннего) отражения. Явление полного отражения может наблюдаться для лучей, падающих из среды с большим показателем преломления на границу со средой с меньшим показателем. Однако предельный угол возникает и для обратного хода лучей (рис.10). В этом

Рис. 10

случае

$$\sin \alpha_2 = \frac{\sin \alpha_1}{n_{21}}.$$

Любому падающему лучу соответствует преломленный луч, причем $0 \leq \alpha_2 \leq \alpha_{\text{пред}}$, где

$$\sin \alpha_{\text{пред}} = \frac{1}{n_{21}},$$

т.е. все вошедшие во вторую среду лучи лежат внутри конуса с углом полураствора $\alpha_{\text{пред}}$.

При падении световых лучей из среды 2 на границу со средой 1 (рис.11)

$$\sin \alpha_1 = n_{21} \sin \alpha_2.$$

Преломленный луч существует только при

Рис. 11

$\sin \alpha_2 \leq 1/n_{21}$, т.е. при $\alpha_2 \leq \alpha_{\text{пред}}$ (луч *a* разделяется на отраженный и преломленный). При $\alpha_2 > \alpha_{\text{пред}}$ происходит полное отражение, как от зеркала (для луча *b* существует только отраженный луч).

Задача 8. На дне сосуда с жидкостью с показателем преломления $n = 5/3$ помещен точечный источник света. Какого минимального радиуса R (в см) должен быть непрозрачный диск, плавающий на поверхности жидкости, чтобы, глядя сверху, нельзя было увидеть этот источник? Высота слоя жидкости $h = 12$ см.

Решение. Ясно, что для диска минимального размера его центр должен располагаться над источником (рис.12). Диск должен преградить путь лучам, падающим под углами, меньшими $\alpha_{\text{пред}}$. Лучи, падающие под большими углами, полностью отражаются. Получаем

Рис. 12

$$R = h \operatorname{tg} \alpha_{\text{пред}},$$

$$\text{где } \sin \alpha_{\text{пред}} = \frac{1}{n} = 0,6, \quad \cos \alpha_{\text{пред}} = 0,8.$$

Таким образом, $R = 9$ см.

Задача 9. В стекле с показателем преломления $n_1 = 1,5$ имеется сферическая полость радиусом $R = 9$ см, заполненная водой с показателем преломления $n_2 = 4/3$. На полость падают параллельные лучи света. Определите радиус (в см) светового пучка, который проникает в полость.

Решение. Угол падения на сферическую поверхность раздела – это угол между падающим лучом и продолжением радиуса, проведенного в точку падения (рис.13). Если угол падения больше $\alpha_{\text{пред}}$, то луч не проникает в полость, происходит полное отражение. Луч, падающий на поверхность раздела под углом $\alpha_{\text{пред}}$, проходит от оси пучка на расстоянии

Рис. 13

$$r = R \sin \alpha_{\text{пред}} = \frac{R}{n_{12}} = \frac{R}{n_1/n_2} = 8 \text{ см.}$$

Задача 10. На плоскую поверхность полушара радиусом $R = 10$ см, изготовленного из прозрачного материала с показателем преломления $n = 1,35$, падает луч параллельно оси полушара. При каком минимальном расстоянии от луча до центра полушара он выйдет наружу строго в обратном направлении без потери интенсивности?

Решение. Во-первых, заметим, что луч все время, вплоть до выхода наружу, остается в плоскости, проведенной через падающий луч и центр полушара. Во-вторых, если луч испытал N отражений от выпуклой поверхности полушара и вышел наружу параллельно начальному направлению, то его

Рис. 14

траектория внутри полушара представляет собой половину правильного $2N$ -угольника (рис.14; здесь $N = 3$). Это становится очевидным, если мысленно представить, что после выхода он попадает в другой такой же полушар.

В этом втором полушаре он проделывает такой же путь и возвращается к первому полушару в начальной точке входа. Вместе две траектории образуют правильный $2N$ -угольник.

Расстояние от центра до точки входа равно высоте правильного $2N$ -угольника, вписанного в окружность: $h = R \sin \alpha_N$, где α_N — угол падения луча на сферическую поверхность, равный

$$\alpha_N = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2N}.$$

Угол падения возрастает с ростом N . Надо найти минимальное N , при котором лучи испытывают полное отражение. При заданном N полное отражение происходит при $\alpha_N > \alpha_{\text{пред}}$, т.е.

$$n > n_N = \frac{1}{\sin \alpha_N}.$$

Для двух отражений

$$n_2 = \frac{1}{\sin(\pi/4)} = \sqrt{2} = 1,41,$$

для трех отражений

$$n_3 = \frac{1}{\sin(\pi/3)} = \frac{2\sqrt{3}}{3} = 1,15$$

и т.д. В нашем случае показатель преломления меньше n_2 , но больше n_3 . Значит, минимальное расстояние соответствует трем полным отражениям и равно

$$h = R \sin \alpha_3 = R \sin \frac{\pi}{3} = 8,7 \text{ см.}$$

Задача 11. Широкий непрозрачный сосуд доверху наполнен жидкостью с показателем преломления $n = 1,25$. Поверхность жидкости закрыли тонкой непрозрачной пластиной, в которой имеется отверстие радиусом $R = 2$ см. Определите диаметр d (в см) светлого пятна на дне сосуда, если он освещается рассеянным светом облачного неба, идущим со всех направлений. Толщина слоя жидкости $h = 6$ см.

Решение. Из каждой точки отверстия внутрь жидкости распространяется конус лучей с углом полураствора $\alpha_{\text{пред}}$ (рис.15).

Рис. 15

Края пятна на дне определяются лучами от краев отверстия. Получаем

$$d = 2R + 2h \operatorname{tg} \alpha_{\text{пред}},$$

$$\text{где } \sin \alpha_{\text{пред}} = \frac{1}{n} = 0,8, \quad \cos \alpha_{\text{пред}} = 0,6.$$

Окончательно, $d = 20$ см.

Задача 12 (ЕГЭ). На поверхности воды плавает надувной плот шириной $l_1 = 4$ м и длиной $l_2 = 6$ м. Небо затянуто сплошным облачным покровом, полностью рассеивающим солнечный свет. Определите глубину тени под плотом. Глубины погружения пловца и рассеиванием света водой пренебречь. Показатель преломления воды относительно воздуха принять равным $n = 4/3$.

Решение. От каждой точки свободной поверхности воды вниз идет конус света с углом полураствора $\alpha_{\text{пред}}$. Под препятствием шириной l_1 максимальная глубина тени

Рис. 16

равна (рис.16)

$$h_1 = \frac{l_1}{2} \operatorname{ctg} \alpha_{\text{пред}},$$

а под препятствием шириной l_2 –

$$h_2 = \frac{l_2}{2} \operatorname{ctg} \alpha_{\text{пред}}.$$

Не освещенными ни с одной стороны (полная тень) будут точки на максимальной глубине h_1 . (Область полной тени имеет форму перевернутой четырехскатной крыши, конек которой находится на глубине h_1 .) Для предельного угла имеем

$$\sin \alpha_{\text{пред}} = \frac{1}{n} = 0,75, \quad \cos \alpha_{\text{пред}} = 0,66.$$

Получаем

$$h_1 = \frac{l_1}{2} \operatorname{ctg} \alpha_{\text{пред}} = 1,76 \text{ м}.$$

Задача 13. Правильная треугольная призма из прозрачного материала с показателем преломления n лежит на столе на одной из своих граней. На одной из двух оставшихся граней сидит паук, а по другой ползет муха. При каких n паук не увидит муху?

Решение. Лучи от мухи входят в призму в виде конуса с углом полураствора $\alpha_{\text{пред}}$ (рис.17). Крайний верхний луч падает на соседнюю грань (где сидит паук) под углом $\beta = 180^\circ - 120^\circ - \alpha_{\text{пред}}$ (угол между двумя

Рис. 17

нормальями равен 120°). Если $\beta \geq \alpha_{\text{пред}}$, то ни один луч не выйдет из грани с пауком. Получаем

$$60^\circ - \alpha_{\text{пред}} \geq \alpha_{\text{пред}}, \quad \alpha_{\text{пред}} \leq 30^\circ,$$

$$\sin \alpha_{\text{пред}} \leq 0,5, \quad \frac{1}{n} \leq 0,5, \quad n \geq 2.$$

Следующая задача демонстрирует, что изображение может формироваться плоской преломляющей поверхностью.

Задача 14. Глубина водоема $h = 2 \text{ м}$. Определите кажущуюся глубину водоема, если его дно рассматривают, склонившись над водой и глядя вертикально вниз. Показатель преломления воды $n = 4/3$. Углы считать малыми, т.е. $\operatorname{tg} \alpha = \sin \alpha = \alpha$.

Решение. Изображение источника лежит в точке пересечения преломленных лучей. Убедимся в том, что все преломленные лучи, составляющие малые углы с вертикалью, пересекаются в одной точке. Один из лучей от источника идет вертикально вверх и выходит из воды не преломляясь. Значит, изображение лежит на этой вертикали. Рассмотрим луч, испущенный источником под произвольным малым углом α к вертикали (рис.18). Угол преломления β связан с углом падения α законом преломления $\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = n$, или, с учетом малости углов, $\beta = n\alpha$. Выразим углы через малое расстояние y между вертикалью и точкой выхода луча и через расстояния x и h :

$$\alpha = \frac{y}{h}, \quad \beta = \frac{y}{x}.$$

Получаем

$$\frac{y}{x} = n \frac{y}{h}, \quad x = \frac{h}{n}.$$

Точка пересечения преломленных лучей с вертикалью действительно не зависит от угла α , т.е. лучи, идущие под малыми углами, формируют мнимое изображение

Рис. 18

предмета на глубине

$$x = \frac{h}{n} = 150 \text{ см.}$$

Отметим, что более универсальный характер имеет не формула для расстояния от изображения до поверхности, а формула для смещения источника в направлении хода лучей, т.е. для расстояния между источником и изображением, которое равно $h - \frac{h}{n}$.

Изображение формируется не только плоской отражающей поверхностью и плоской преломляющей поверхностью, но и сферическими поверхностями. Изображения в таких системах можно строить и рассчитывать, не опираясь на общую теорию сферических зеркал и поверхностей, которую в большинстве школ не проходят. Для нахождения изображения надо действовать примерно так же, как в случае плоской преломляющей поверхности. Все малые углы отсчитываются от оси — луча, проходящего через источник и центр шара (этот луч выходит из системы без изменения направления). Для произвольного испущенного источником луча строится выходящий луч и рассчитывается связь между тремя (а не двумя!) углами: между осью и испущенным лучом (α), между осью и проведенным в точку отражения или преломления радиусом (γ) и между осью и выходящим лучом (β). Отсюда получают связь между положением источника и положением изображения.

Задача 15. Источник находится рядом с зеркальным шаром радиусом $R = 15$ см на расстоянии $l = 2R$ от ближайшей к нему точки шара. На каком расстоянии l' от этой точки находится изображение? Углы считать малыми.

Решение. Пускаем на зеркало луч под произвольным малым углом α к оси (рис.19).

Рис. 19

Проводим из центра в точку падения радиус, который является нормалью, угол между этим радиусом и осью обозначаем γ . Строим отраженный луч и продолжаем его до пересечения с осью — этот угол обозначаем β (здесь находится изображение). Угол падения равен $\alpha + \gamma$, угол между отраженным лучом и нормалью также равен $\alpha + \gamma$. Проведя в точке падения линию, параллельную оси, видим, что угол β равен сумме угла отражения $\alpha + \gamma$ и угла наклона нормали γ :

$$\beta = \alpha + 2\gamma.$$

Подставляя сюда, с учетом малости углов,

$$\alpha = \frac{h}{l}, \quad \beta = \frac{h}{l'}, \quad \gamma = \frac{h}{R},$$

получаем

$$\frac{1}{l'} = \frac{1}{l} + \frac{2}{R}, \quad \text{откуда } l' = 0,4R = 6 \text{ см.}$$

Задача 16. Аквариум из тонкого стекла имеет форму шара радиусом $R = 3$ м. Аквариум заполнили водой и запустили туда маленькую рыбку. В какой-то момент рыбка оказалась между глазами наблюдателя и центром шара на расстоянии $a = 1$ м от центра. На сколько сантиметров кажущееся положение рыбки будет ближе реального? Показатель преломления воды $n = 4/3$. Углы считать малыми.

Решение. Пускаем от источника (рыбки) в сторону наблюдателя луч под малым углом α к оси (рис.20). Проводим в точку падения

Рис. 20

этого луча на поверхность радиус, который является нормалью; угол между нормалью и осью обозначаем γ . Из треугольника (α — внешний угол) видно, что угол падения равен $\alpha - \gamma$. Из закона преломления, с учетом малости углов, следует, что угол преломления равен $n(\alpha - \gamma)$. Продолжаем преломленный луч до пересечения с осью — здесь находится изображение. Проведя в

точке преломления линию, параллельную оси, получим, что угол между преломленным лучом и осью равен

$$\beta = n(\alpha - \gamma) + \gamma.$$

Подставляя сюда, с учетом малости углов,

$$\alpha = \frac{h}{l}, \quad \beta = \frac{h}{l'}, \quad \gamma = \frac{h}{R},$$

где $l = R - a = 2$ м и l' – расстояния от источника и изображения до точки пересечения оси с поверхностью шара, получаем

$$\frac{1}{l'} = \frac{n}{l} - \frac{n-1}{R},$$

откуда находим

$$l' = 1,8 \text{ м},$$

т.е. кажущееся положение рыбки будет ближе реального на 20 см.

И на десерт – задача про систему с плавно меняющимся показателем преломления. Наиболее известное проявление таких систем – миражи в пустыне или над раскаленным на солнце шоссе. У поверхности воздух горячий, показатель преломления меньше, что может приводить к отражению скользких лучей и к зрительному ощущению зеркальной (или водной) поверхности.

Задача 17. Луч света, распространяющийся в прозрачной среде с показателем преломления $n_0 = 2$, падает под углом α_0 ($\sin \alpha_0 = 0,9$) на стеклянную пластину толщиной $d = 10$ мм. Показатель преломления пластины линейно меняется от $n_1 = 2,5$ на ближней поверхности до $n_2 = 1,5$ на дальней. На какую глубину луч проникнет в пластину?

Решение. Разобьем пластину с переменным показателем преломления на много плоских тонких слоев с показателем преломления n_i в i -м слое. Закон преломления можно записать в виде

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2.$$

При переходе луча от слоя к слою будет выполняться равенство

$$n_i \sin \alpha_i = n_0 \sin \alpha_0.$$

С уменьшением n угол α будет увеличиваться. Максимальная глубина проникновения луча соответствует $\alpha = 90^\circ$:

$$n_{\min} \sin 90^\circ = n_0 \sin \alpha_0.$$

Получаем $n_{\min} = 1,8$, что соответствует глубине 7 мм.

Упражнения

1. Плоское зеркало движется по направлению к точечному источнику света со скоростью 10 см/с. С какой скоростью (в см/с) движется изображение? Направление скорости перпендикулярно плоскости зеркала.

2. Сколько изображений получится от предмета в двух плоских зеркалах, поставленных под углом 60° друг к другу? А под углом 120° ?

3. Луч света падает на плоское зеркало под углом, синус которого 0,75. На сколько миллиметров сместится отраженный луч, если на зеркало положить прозрачную пластину толщиной 2 см с показателем преломления $4/3$?

4. При переходе луча света из первой среды во вторую угол преломления 45° , а при переходе из первой среды в третью угол преломления 30° (при том же угле падения). Найдите предельный угол (в градусах) полного внутреннего отражения для луча, идущего из третьей среды во вторую.

5. На верхней грани прозрачного кубика сидит паук, а по боковой грани ползет муха. При каком наименьшем показателе преломления материала кубика паук не увидит муху?

6. Пловец, нырнувший с открытыми глазами, рассматривает из-под воды светящийся предмет, находящийся над его головой на высоте 75 см над поверхностью воды. Какова будет видимая высота (в см) предмета над поверхностью воды? Показатель преломления воды $4/3$. Углы считать малыми.

7. На дне сосуда с водой лежит плоское зеркало. Толщина слоя воды 16 см. На расстоянии 20 см от поверхности воды находится точечный источник света. На каком расстоянии (в см) от зеркала находится его изображение, образуемое лучами, вышедшими обратно из воды? Показатель преломления воды $4/3$. Углы считать малыми.

8. На поверхность стеклянного шара радиусом 5 см нанесли черное пятнышко. Пятнышко разглядывают с диаметрально противоположной стороны шара. На каком расстоянии (в см) от ближайшей поверхности стекла окажется его видимое положение? Показатель преломления стекла 1,5.

9. Светящаяся точка находится на расстоянии 6 см от собирающей линзы с фокусным расстоянием 5 см. На какое расстояние (в см) сместится изображение точки, если между ней и линзой поставить стеклянную плоскопараллельную пластину? Пластина установлена перпендикулярно оптической оси линзы, толщина пластины 4,5 см, показатель преломления стекла 1,5.