

Преломление света

Темы кодификатора ЕГЭ: закон преломления света, полное внутреннее отражение.

На границе раздела двух прозрачных сред наряду с отражением света наблюдается его *преломление* — свет, переходя в другую среду, меняет направление своего распространения.

Преломление светового луча происходит при его *наклонном* падении на поверхность раздела (правда, не всегда — читайте дальше про полное внутреннее отражение). Если же луч падает перпендикулярно поверхности, то преломления не будет — во второй среде луч сохранит своё направление и также пойдёт перпендикулярно поверхности.

Закон преломления (частный случай)

Мы начнём с частного случая, когда одна из сред является воздухом. Именно такая ситуация присутствует в подавляющем большинстве задач. Мы обсудим соответствующий частный случай закона преломления, а уж затем дадим самую общую его формулировку.

Предположим, что луч света, идущий в воздухе, наклонно падает на поверхность стекла, воды или какой-либо другой прозрачной среды. При переходе в среду луч преломляется, и его дальнейший ход показан на рис. 1.

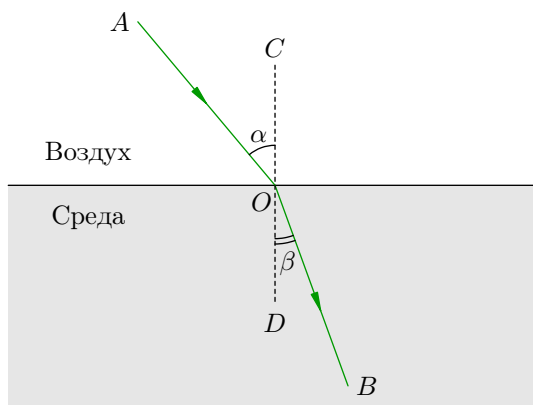


Рис. 1. Преломление луча на границе «воздух–среда»

В точке падения O проведён перпендикуляр (или, как ещё говорят, *нормаль*) CD к поверхности среды. Луч AO , как и раньше, называется *падающим лучом*, а угол α между падающим лучом и нормалью — *углом падения*. Луч OB — это *преломлённый луч*; угол β между преломлённым лучом и нормалью к поверхности называется *углом преломления*.

Всякая прозрачная среда характеризуется величиной n , которая называется *показателем преломления* этой среды. Показатели преломления различных сред можно найти в таблицах. Например, для стекла $n = 1,6$, а для воды $n = 1,33$. Вообще, у любой среды $n > 1$; показатель преломления равен единице только в вакууме. У воздуха $n = 1,0003$, поэтому для воздуха с достаточной точностью можно полагать в задачах $n = 1$ (в оптике воздух не сильно отличается от вакуума).

Закон преломления (переход «воздух–среда»).

1) *Падающий луч, преломлённый луч и нормаль к поверхности, проведённая в точке падения, лежат в одной плоскости.*

2) Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления равно показателю преломления среды:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n. \quad (1)$$

Поскольку $n > 1$, из соотношения (1) следует, что $\sin \alpha > \sin \beta$, то есть $\alpha > \beta$ — угол преломления меньше угла падения. Запоминаем: *переходя из воздуха в среду, луч после преломления идёт ближе к нормали*.

Показатель преломления непосредственно связан со скоростью v распространения света в данной среде. Эта скорость всегда меньше скорости света в вакууме: $v < c$. И вот оказывается, что

$$n = \frac{c}{v}. \quad (2)$$

Почему так получается, мы с вами поймём при изучении волновой оптики. А пока скомбинируем формулы (1) и (2):

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c}{v}. \quad (3)$$

Так как показатель преломления воздуха очень близок единице, мы можем считать, что скорость света в воздухе примерно равна скорости света в вакууме c . Приняв это во внимание и глядя на формулу (3), делаем вывод: *отношение синуса угла падения к синусу угла преломления равно отношению скорости света в воздухе к скорости света в среде*.

Обратимость световых лучей

Теперь рассмотрим обратный ход луча: его преломление при переходе из среды в воздух. Здесь нам окажет помощь следующий полезный принцип.

Принцип обратимости световых лучей. *Траектория луча не зависит от того, в прямом или обратном направлении распространяется луч. Двигаясь в обратном направлении, луч пойдёт в точности по тому же пути, что и в прямом направлении.*

Согласно принципу обратимости, при переходе из среды в воздух луч пойдёт по той же самой траектории, что и при соответствующем переходе из воздуха в среду (рис. 2) Единственное отличие рис. 2 от рис. 1 состоит в том, что направление луча поменялось на противоположное.

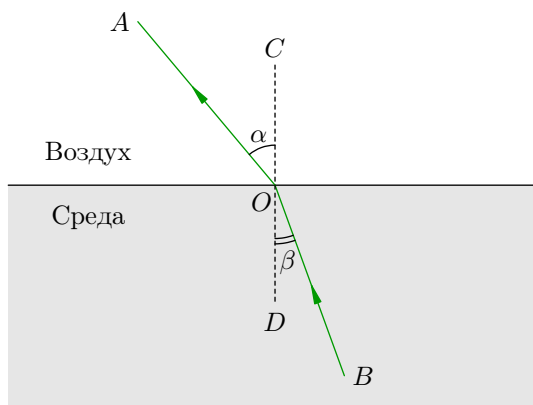


Рис. 2. Преломление луча на границе «среда–воздух»

Раз геометрическая картинка не изменилась, той же самой останется и формула (1): отношение синуса угла α к синусу угла β по-прежнему равно показателю преломления среды. Правда, теперь углы поменялись ролями: угол β стал углом падения, а угол α — углом преломления.

В любом случае, как бы ни шёл луч — из воздуха в среду или из среды в воздух — работает следующее простое правило. *Берём два угла — угол падения и угол преломления; отношение синуса большего угла к синусу меньшего угла равно показателю преломления среды.*

Теперь мы целиком подготовлены для того, чтобы обсудить закон преломления в самом общем случае.

Закон преломления (общий случай)

Пусть свет переходит из среды 1 с показателем преломления n_1 в среду 2 с показателем преломления n_2 . Среда с бóльшим показателем преломления называется *оптически более плотной*; соответственно, среда с меньшим показателем преломления называется *оптически менее плотной*.

Переходя из оптически менее плотной среды в оптически более плотную, световой луч после преломления идёт ближе к нормали (рис. 3). В этом случае угол падения больше угла преломления: $\alpha > \beta$.

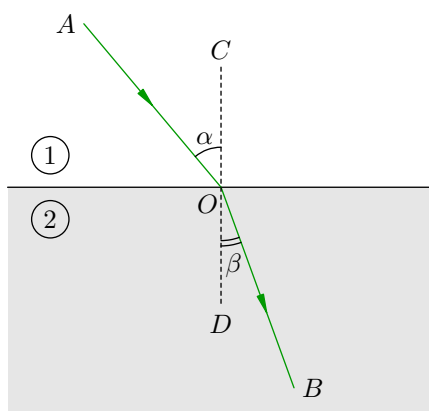


Рис. 3. $n_1 < n_2 \Rightarrow \alpha > \beta$

Наоборот, переходя из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, луч отклоняется дальше от нормали (рис. 4). Здесь угол падения меньше угла преломления: $\alpha < \beta$.

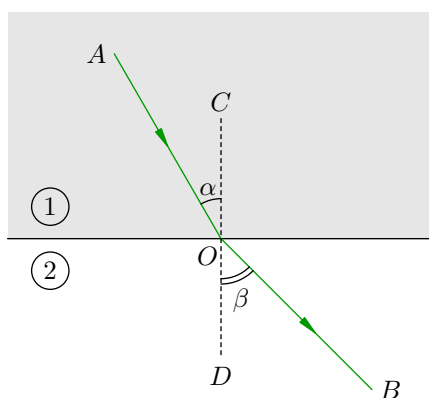


Рис. 4. $n_1 > n_2 \Rightarrow \alpha < \beta$

Оказывается, оба этих случая охватываются одной формулой — общим законом преломления, справедливым для любых двух прозрачных сред.

Закон преломления.

1) *Падающий луч, преломлённый луч и нормаль к поверхности раздела сред, проведённая в точке падения, лежат в одной плоскости.*

2) *Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления равно отношению показателя преломления второй среды к показателю преломления первой среды:*

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (4)$$

Нетрудно видеть, что сформулированный ранее закон преломления для перехода «воздух–среда» является частным случаем данного закона. В самом деле, полагая в формуле (4) $n_1 = 1$ и $n_2 = n$, мы придём к формуле (1).

Вспомним теперь, что показатель преломления — это отношение скорости света в вакууме к скорости света в данной среде: $n_1 = c/v_1$, $n_2 = c/v_2$. Подставляя это в (4), получим:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (5)$$

Формула (5) естественным образом обобщает формулу (3). *Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления равно отношению скорости света в первой среде к скорости света во второй среде.*

Полное внутреннее отражение

При переходе световых лучей из оптически более плотной среды в оптически менее плотную наблюдается интересное явление — *полное внутреннее отражение*. Давайте разберёмся, что это такое.

Будем считать для определённости, что свет идёт из воды в воздух. Предположим, что в глубине водоёма находится точечный источник света S , испускающий лучи во все стороны. Мы рассмотрим некоторые из этих лучей (рис. 5).

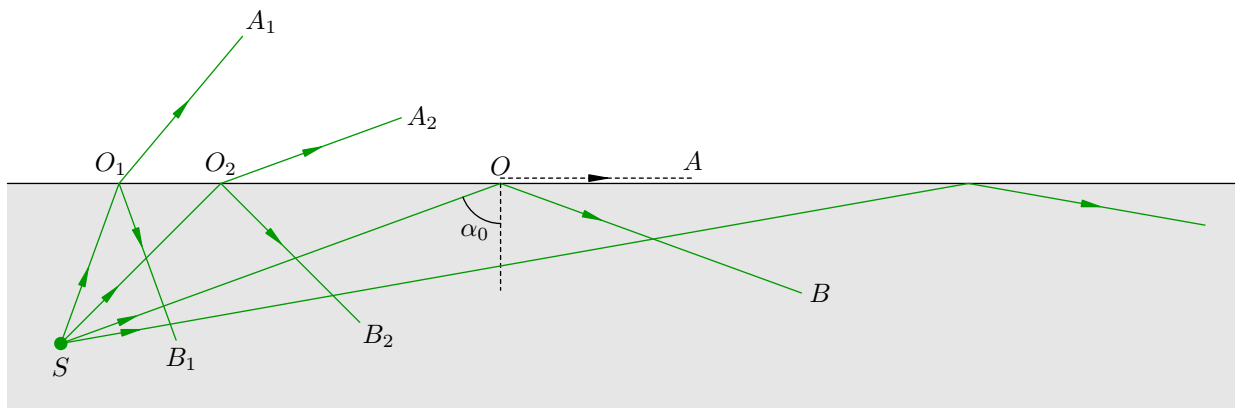


Рис. 5. Полное внутреннее отражение

Луч SO_1 падает на поверхность воды под наименьшим углом. Этот луч частично преломляется (луч O_1A_1) и частично отражается назад в воду (луч O_1B_1). Таким образом, часть энергии падающего луча передаётся преломлённому лучу, а оставшаяся часть энергии — отражённому лучу.

Угол падения луча SO_2 больше. Этот луч также разделяется на два луча — преломлённый и отражённый. Но энергия исходного луча распределяется между ними по-другому: преломлённый луч O_2A_2 будет тусклее, чем луч O_1A_1 (то есть получит меньшую долю энергии), а отражённый луч O_2B_2 — соответственно ярче, чем луч O_1B_1 (он получит большую долю энергии).

По мере увеличения угла падения прослеживается та же закономерность: всё бóльшая доля энергии падающего луча достаётся отражённому лучу, и всё меньшая — преломлённому лучу. Преломлённый луч становится всё тусклее и тусклее, и в какой-то момент исчезает совсем!

Это исчезновение происходит при достижении угла падения α_0 , которому отвечает угол преломления 90° . В данной ситуации преломлённый луч OA должен был бы пойти параллельно поверхности воды, да идти уже нечему — вся энергия падающего луча SO целиком досталась отражённому лучу OB .

При дальнейшем увеличении угла падения преломлённый луч и подавно будет отсутствовать.

Описанное явление и есть полное внутреннее отражение. Вода не выпускает наружу лучи с углами падения, равными или превышающими некоторое значение α_0 — все такие лучи целиком отражаются назад в воду. Угол α_0 называется *предельным углом полного отражения*.

Величину α_0 легко найти из закона преломления. Имеем:

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n}.$$

Но $\sin 90^\circ = 1$, поэтому

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n},$$

откуда

$$\alpha_0 = \arcsin \frac{1}{n}.$$

Так, для воды предельный угол полного отражения равен:

$$\alpha_0 = \arcsin \frac{1}{1,33} \approx 48,8^\circ.$$

Явление полного внутреннего отражения вы легко можете наблюдать дома. Налейте воду в стакан, поднимите его и смотрите на поверхность воды чуть снизу сквозь стенку стакана. Вы увидите серебристый блеск поверхности — вследствие полного внутреннего отражения она ведёт себя подобно зеркалу.

Важнейшим техническим применением полного внутреннего отражения является *волоконная оптика*. Световые лучи, запущенные внутрь оптоволоконного кабеля (*световода*) почти параллельно его оси, падают на поверхность под большими углами и целиком, без потери энергии отражаются назад внутрь кабеля. Многократно отражаясь, лучи идут всё дальше и дальше, перенося энергию на значительное расстояние. Волоконно-оптическая связь применяется, например, в сетях кабельного телевидения и высокоскоростного доступа в Интернет.