

§ 40. ЗАЛОМЛЕННЯ СВІТЛА



Рис. 40.1. Заломлення світла



Коли ми, стоячи на березі водойми, намагаємося визначити на око її глибину, вона завжди здається меншою, ніж є насправді. Ложка або соломинка у склянці з водою здається нам зламаною на межі повітря і води. Якщо дивитись на предмети крізь скляний глечик, то вони здаються викривленими (рис. 40.1). Як ви вже знаєте, всі ці явища пояснюються заломленням світла. Згадаємо його причину та встановимо закон заломлення світла.

1 У чому причина заломлення світла

Якщо пучок світла падає на межу поділу двох прозорих середовищ, то частина світлової енергії повертається в перше середовище, утворюючи відбитий пучок світла, а частина — проходить через межу в друге середовище, утворюючи пучок світла, який, як правило, змінює напрямок (рис. 40.2).

Зміну напрямку поширення світла в разі його проходження через межу поділу двох середовищ називають **заломленням світла**.

Промінь, що задає напрямок заломленого пучка світла, називають **заломленим променем**. Кут, утворений заломленим променем і перпендикуляром до межі поділу двох середовищ, поставленим із точки падіння променя, називається **кутом заломлення**.

Кількісний закон, що описує заломлення світла, був установлений експериментально лише в 1621 р. голландським природознавцем Віллебрордом Снелліусом (1580–1626) і отримав назву **закону Снелліуса**. Одержимо цей закон за допомогою принципу Гюйгенса.

2 Встановлення закону заломлення світла на основі принципу Гюйгенса

Розглянемо плоску хвилю, що падає на межу поділу MN двох середовищ (рис. 40.3). Напрямок поширення хвилі задамо променями A_1A і B_1B , паралельними один одному та перпендикулярними до хвильової поверхні AC . Зрозуміло, що спочатку поверхні MN досягне промінь A_1A . Промінь B_1B досягне її через час $\Delta t = \frac{CB}{v_1}$, де v_1 — швидкість світла у першому середовищі. У момент, коли вторинна хвиля в точці B тільки починає збуджуватися, хвиля від точки A вже пошириться у другому середовищі на відстань $AD = v_2 \Delta t$, де v_2 — швидкість світла у другому середовищі. Провівши площину BD , дотичну до всіх вторинних хвиль, одержимо хвильову поверхню заломленої хвилі.

Розглянемо прямокутні трикутники ACB і ADB . У трикутнику ACB кут CAB дорівнює

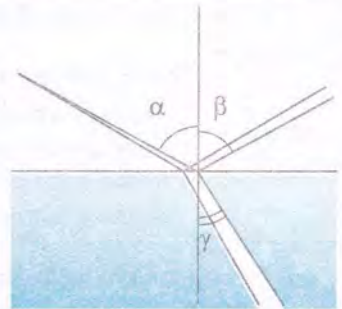


Рис. 40.2. Спостереження заломлення світла за допомогою оптичної шайби: α — кут падіння; β — кут відбивання; γ — кут заломлення

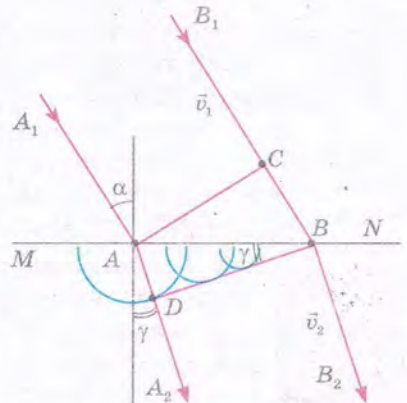


Рис. 40.3. Заломлення плоскої хвилі на плоскій межі поділу MN : хвильова поверхня падаючої хвилі — площина AC , заломленої хвилі — площина BD ; α — кут падіння, γ — кут заломлення

куту падіння α (як кути з відповідно перпендикулярними сторонами), отже, $CB = AB \sin \alpha$. Враховуючи, що $CB = v_1 \Delta t$, знайдемо AB :

$$AB = \frac{v_1}{\sin \alpha} \Delta t \quad (1).$$

Аналогічно в трикутнику ADB кут ABD дорівнює

куту заломлення γ , отже, $AD = AB \sin \gamma$. Враховуючи, що $AD = v_2 \Delta t$, знайдемо AB : $AB = \frac{v_2}{\sin \gamma} \Delta t \quad (2).$

Прирівнявши вирази (1) і (2), маємо: $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21}$, де n_{21} — стала величина, яка не залежить від кута падіння світла.

Закон заломлення світла (закон Снелліуса):

Промінь падаючий, промінь заломлений і перпендикуляр до межі поділу середовищ, поставлений із точки падіння променя, лежать в одній площині; відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення для двох даних середовищ є величиною сталою:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21}.$$

3

Що характеризує показник заломлення

Фізична величина n_{21} , яка входить у математичний запис закону заломлення світла, називається *відносним показником заломлення*, або показником заломлення другого середовища відносно першого. Відносний показник заломлення зазначає, у скільки разів швидкість світла v_1 у першому середовищі більша (менша) за швидкість світла v_2 у другому середовищі: $n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$.

Саме зміна швидкості поширення світла в разі його переходу з одного прозорого середовища в інше є причиною заломлення світла.

Прийнято говорити про *оптичну густину середовища*: чим меншою є швидкість світла в середовищі, тим більшою є його оптична густина. Так, повітря має більшу оптичну густину, ніж вакуум, оскільки в повітрі швидкість світла дещо менша, ніж у вакуумі. Оптична густина води менша за оптичну густину алмазу, оскільки швидкість світла у воді більша, ніж в алмазі. Зазвичай швидкість світла в середовищі порівнюють з його швидкістю у вакуумі. Фізичну величину, яка зазначає, у скільки разів швидкість світла в середовищі менша, ніж у вакуумі, називають *абсолютним показником заломлення середовища*.

Абсолютний показник заломлення середовища n — це фізична величина, яка характеризує оптичну густину середовища і дорівнює відношенню швидкості c світла у вакуумі до швидкості v світла в середовищі:

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

Абсолютний показник заломлення залежить від фізичного стану середовища (температури, густини та ін.) і від властивостей світлової хвилі, тобто її довжини (або частоти) (див. § 34). Тому в таблицях зазвичай указують стан середовища і довжину світлової хвилі або середній показник для даного діапазону довжин хвиль (таблиця).

Зверніть увагу: відносний показник заломлення дорівнює $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$, де n_1 і n_2 — абсолютні показники заломлення першого та другого середовищ.

4 Повне відбивання світла

Розглянемо докладніше випадок, коли світло переходить із середовища з більшою оптичною густиною в середовище з меншою оптичною густиною. У цьому випадку $n_2 < n_1$, тому згідно із законом заломлення світла $\sin \alpha < \sin \gamma$. Отже, кут заломлення γ завжди більший, ніж кут падіння α .

Подивимось, як змінюватиметься кут заломлення світлового пучка в разі збільшення кута його падіння. Для цього схематично зобразимо падіння пучка світла на поверхню поділу середовищ, поступово збільшуючи кут падіння (рис. 40.4) і пам'ятаючи, що світло завжди частково відбивається від межі поділу середовищ. Ми бачимо, що заломлений пучок світла наближається до межі поділу двох середовищ, при цьому його яскравість зменшується, а яскравість відбитого пучка світла, навпаки, збільшується. При певному куті падіння α_0 , коли кут заломлення досягає 90° , заломлений пучок світла зникає, а весь падаючий пучок світла повертається в перше середовище — світло повністю відбивається. Зрозуміло, що в разі подальшого збільшення кута падіння ($\alpha > \alpha_0$) заломлення світла не спостерігатиметься.

Явище, за якого заломлення світла відсутнє, тобто світло повністю відбивається від середовища з меншою оптичною густиною, називається **повним внутрішнім відбиванням**.

Граничний кут повного внутрішнього відбивання α_0 — це найменший кут падіння, при якому настає повне внутрішнє відбивання.

*Абсолютний показник заломлення n
(середній для променів видимого діапазону)*

Речовина	n
Повітря	1,003
Лід	1,31
Вода	1,33
Етиловий спирт	1,36
Бензин	1,50
Скло	1,52
Кварц	1,54
Алмаз	2,42

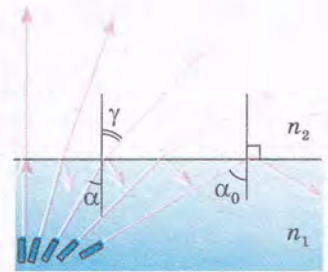


Рис. 40.4. Світло падає із середовища з більшою оптичною густиною в середовище з меншою оптичною густиною

За законом заломлення світла $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1}$, отже, при $\gamma = 90^\circ$:

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1} \sin 90^\circ = \frac{n_2}{n_1}.$$

5 Де застосовують явище повного відбивання світла

Повне відбивання світла знайшло застосування в оптичній техніці. Наприклад, в багатьох оптичних приладах потрібно змінювати напрямок поширення світлових пучків із мінімальними втратами енергії на поверхнях оптичних деталей. З цією метою застосовують так звані призми повного відбивання (рис. 40.5).

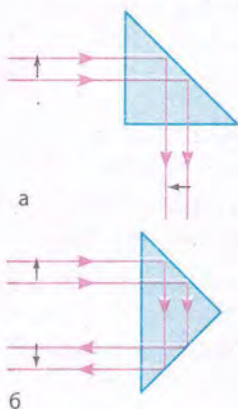


Рис. 40.5. Хід променів світла в поворотній (а) та оборотній (б) призмах повного відбивання

Найбільш інтенсивно явище повного відбивання світла використовують при створенні волоконних оптичних систем. Якщо в торець суцільної скляної трубки спрямувати пучок світла, то після багаторазового відбивання світло вийде на її протилежному кінці (рис. 40.6). Це відбудеться незалежно від того, якою буде трубка — вигнутою чи прямою. Тому перші світловоди (гнучкі нитки, що проводять світло на основі повного внутрішнього відбивання) стали використовувати для підсвічування важкодоступних місць: світловий пучок спрямовується на один кінець світловода, а другий кінець освітлює потрібне місце. Цю технологію використовують у медицині для дослідження внутрішніх органів (ендоскопія), у техніці, зокрема для визначення дефектів усередині моторів без їх розбирання.

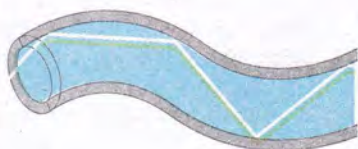


Рис. 40.6. Хід променя світла у світловоді

Однак найбільше світловоди поширені як кабелі для передачі інформації. Волоконно-оптичний кабель є набагато дешевшим і легшим за стандартний мідний, він практично не змінює своїх властивостей під впливом навколишнього середовища, дозволяє передавати більше інформації тощо. Сьогодні волоконно-оптичні лінії зв'язку стрімко витісняють традиційні.

6 Учимся розв'язувати задачі

Задача. У дно водойми глибиною 2,5 м вбито стовп так, що його верхня частина піднімається над поверхнею води на 1,0 м. Обчисліть довжину тіні стовпа на дні водойми, якщо висота сонця над горизонтом 30° .

L — ?

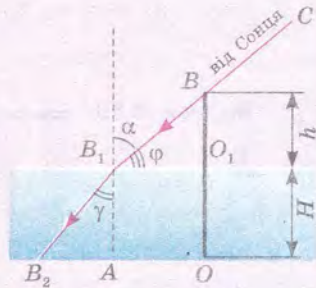
Дано:

 $H = 2,5$ м $h = 1,0$ м $\varphi = 30^\circ$ $n = 1,33$ **Аналіз фізичної проблеми**

Виконаємо пояснювальний рисунок. У точці B_1 на межі поділу повітря і води прямолінійність поширення променя CB порушується. Отже, тінь від стовпа на дні водойми дорівнюватиме довжині відрізка OB_2 :

$$OB_2 = B_2A + AO = B_2A + B_1O_1.$$

Таким чином, необхідно: 1) використавши закон прямолінійного поширення світла, знайти положення точки B_1 ; 2) використавши закон заломлення, знайти напрямок поширення променя B_1B_2 ; 3) скориставшись прямолінійністю поширення світла у воді, визначити положення точки B_2 . Будемо вважати, що показник заломлення води відносно повітря дорівнює абсолютному показнику заломлення води.



Побудова математичної моделі, розв'язання. Довжина тіні стовпа на дні водойми дорівнює: $L = B_2A + B_1O_1$ (*). Із прямокутного трикутника BO_1B_1 : $B_1O_1 = BO_1 \operatorname{ctg} \varphi = h \operatorname{ctg} \varphi = 1,0 \text{ м} \cdot \operatorname{ctg} 30^\circ = 1,73 \text{ м}$.

Кут падіння α променя BB_1 дорівнює: $\alpha = 90^\circ - \varphi = 60^\circ$.

За законом заломлення світла: $\sin \gamma = \frac{\sin \alpha}{n} = \frac{\sin 60^\circ}{1,33} = \frac{0,866}{1,33} = 0,651$.

Отже, $\gamma \approx 41^\circ$. Із прямокутного трикутника B_2AB_1 : $B_2A = B_1A \operatorname{tg} \gamma = H \operatorname{tg} \gamma = 2,5 \text{ м} \cdot \operatorname{tg} 41^\circ = 2,17 \text{ м}$.

З урахуванням співвідношення (*) маємо: $L = 2,17 \text{ м} + 1,73 \text{ м} = 3,9 \text{ м}$.

Відповідь: довжина тіні стовпа на дні водойми $L = 3,9$ м.

! Підбиваємо підсумки

Зміна напрямку поширення світла в разі його проходження через межу поділу двох прозорих середовищ називається заломленням світла. Заломлення світла підпорядковується закону Снелліуса: промінь падаючий, промінь заломлений і перпендикуляр до межі поділу середовищ, поставлений із точки падіння променя, лежать в одній площині; відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення для двох даних середовищ є величиною сталою: $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$, де n_{21} — відносний показник заломлення, який зазначає, у скільки разів швидкість світла v_1 у першому середовищі відрізняється від швидкості світла v_2 у другому середовищі.

Якщо при переході світла з одного середовища в інше швидкість світла зменшується, то говорять, що світло перейшло із середовища з меншою оптичною густиною в середовище з більшою оптичною густиною, і навпаки.

Якщо світло переходить із середовища з більшою оптичною густиною в середовище з меншою оптичною густиною, то в разі досягнення певного граничного кута падіння спостерігається повне внутрішнє відбивання світла.

**Контрольні запитання**

1. Які явища ми спостерігаємо, коли світло проходить через межу поділу двох середовищ? 2. Який кут називається кутом заломлення? 3. Доведіть закон заломлення світла, користуючись принципом Гюйгенса, та сформулюйте цей закон. 4. У чому причина заломлення світла? 5. Який фізичний зміст відносного та абсолютного показників заломлення світла? 6. За яких умов на межі двох середовищ може спостерігатися повне внутрішнє відбивання? 7. Що таке кут повного внутрішнього відбивання? Як він пов'язаний із показником заломлення? 8. Наведіть приклади застосування повного внутрішнього відбивання світла.

**Вправа № 30**

1. Перенесіть рис. 1 у зошит. Вважаючи, що середовище 1 має більшу оптичну густину, ніж середовище 2, для кожного випадку схематично побудуйте падаючий або заломлений промінь, позначте кути падіння й заломлення.

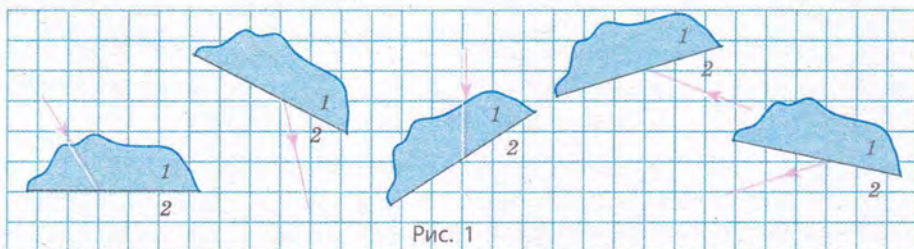


Рис. 1

- Визначте швидкість світла: в алмазі; у воді; у льоді.
- Визначте кут повного внутрішнього відбивання для межі поділу середовищ: вода — повітря; алмаз — вода; скло — вода.
- Світло падає з повітря на поверхню деякої прозорої речовини під кутом 45° . Визначте абсолютний показник заломлення цієї речовини, якщо заломлене світло поширюється під кутом 60° до поверхні поділу середовищ.
- Обчисліть товщину d скляної плоскопаралельної пластинки (рис. 2), після проходження якої світловий промінь зміщується на відстань $l = 4$ мм. Кут падіння світла на пластинку $\alpha = 45^\circ$.
- Визначте діаметр світлої круглої плями на поверхні води в басейні, якщо лампа, яка утворює цю пляму, розташована на глибині 2,4 м. Світло від лампи поширюється в усіх напрямках.
- Промінь світла, що падає на бічну грань рівнобічної призми із заломлюючим кутом θ , після заломлення йде паралельно основі призми (рис. 3). Після виходу з призми він виявляється відхиленим від початкового напрямку на кут ϕ . Знайдіть показник заломлення речовини, з якої виготовлена призма.

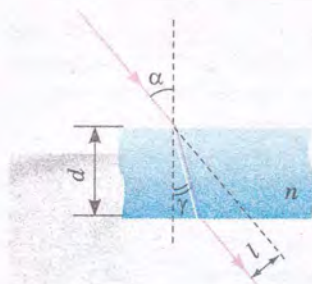


Рис. 2

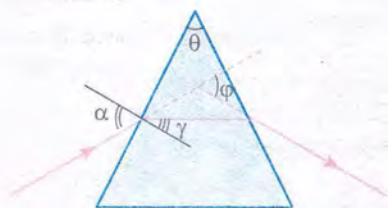


Рис. 3