



§ 26. ЗАЛОМЛЕННЯ СВІТЛА. ЗАКОНИ ЗАЛОМЛЕННЯ СВІТЛА. ПОВНЕ ВІДБИВАННЯ 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 здаються нам зламаними на межі повітря й води. 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. 26.1).

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, проведеним із точки падіння променя, називають кутом заломлення.*

Кількісний закон, що описує заломлення світла, був установлений експериментально в 1621 р. голландським природознавцем *Віллебрордом Снелліусом* (1580–1626) й отримав назву **закон 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. 26.2). 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 , а вже після цього її досягне промінь B_1B — через час $\Delta t = \frac{CB}{v_1}$, де v_1 — швидкість світла у першому середовищі.

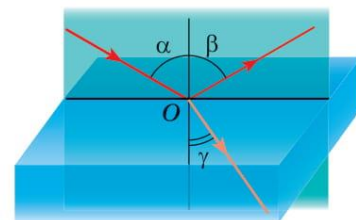
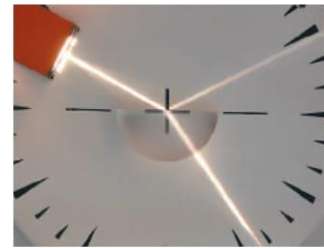


Рис. 26.1. Спостереження заломлення світла у випадку його переходу з повітря в скло: α — кут падіння; β — кут відбивання; γ — кут заломлення

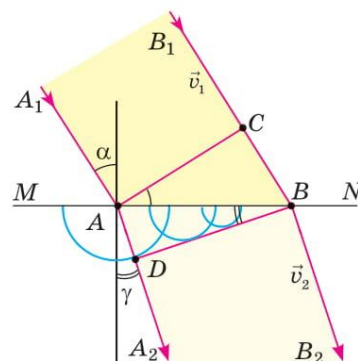


Рис. 26.2. Заломлення плоскої хвилі на плоскій межі поділу MN : хвильова поверхня падаючої хвилі — площина AC , заломленої хвилі — площина DB ; α — кут падіння, γ — кут заломлення

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 DB , дотичну до всіх вторинних хвиль, одержимо хвильову поверхню заломленої хвилі.

Розглянемо прямокутні трикутники ACB і ADB . У трикутнику ACB кут CAB дорівнює куту падіння α (як кути з відповідно перпендикулярними сторонами), отже, $CB = AB \sin \alpha$. Ураховавши, 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, $AD = AB \sin \gamma$. Ураховавши, що $AD = v_2 \Delta t$, знайдемо AB :

$$AB = \frac{v_2}{\sin \gamma} \Delta t \quad (2).$$

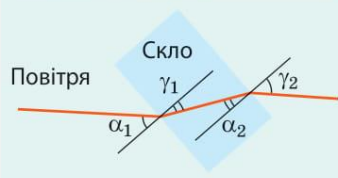
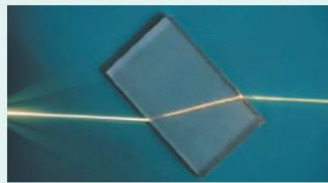
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21}, \text{ де } n_{21} \text{ — відносний показник заломлення (показник заломлення середовища 2 відносно середовища 1) — незмінна для двох даних середовищ величина, яка не залежить від кута падіння світла.}$$

Властивості заломлення світла

Чим більше змінюється швидкість світла, тим більше світло заломлюється.

Якщо промінь світла (див. рисунок) переходить у середовище з більшою оптичною густиною (швидкість світла зменшується: $v_2 < v_1$), то кут заломлення є меншим від кута падіння: $\gamma_1 < \alpha_1$.

Якщо промінь світла переходить у середовище з меншою оптичною густиною (швидкість світла збільшується: $v_2 > v_1$), то кут заломлення є більшим за кут падіння: $\gamma_2 > \alpha_2$.



Закони заломлення світла (закони Снелліуса)

1. Промінь падаючий, промінь заломлений і перпендикуляр до межі поділу двох середовищ, проведений із точки падіння променя, лежать в одній площині.

2. Для двох даних середовищ відношення синуса кута падіння α до синуса кута заломлення γ є величиною незмінною:

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

3

Що характеризує показник заломлення

Відносний показник заломлення показує, у скільки разів швидкість поширення світла в середовищі 1 більша (або менша), ніж швидкість поширення світла в середовищі 2:

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

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 більшою є оптична густина середовища, тим меншою є швидкість поширення світла в цьому середовищі. Так, оптична густина води менша від оптичної густини

алмазу, відповідно швидкість світла у воді більша, ніж в алмазі. Зазвичай швидкість світла в середовищі порівнюють з його швидкістю у вакуумі.

Фізичну величину, яка характеризує оптичну густину середовища і показує, у скільки разів швидкість поширення світла в середовищі менша, ніж у вакуумі, називають **абсолютним показником заломлення середовища**:

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

Абсолютний показник заломлення залежить від фізичного стану середовища (температури, густини та ін.) і від частоти світлової хвилі. Тому в таблицях зазвичай указують або стан середовища і частоту світлової хвилі, або середній показник заломлення для даного діапазону довжин хвиль (див. табл. 1).

Доведіть, що відносний показник заломлення можна визначити за формулою: $n_{21} = n_2 / n_1$, де n_1 , n_2 — абсолютні показники заломлення першого та другого середовищ відповідно.

4 Повне відбивання світла

Розглянемо випадок, коли світло переходить із середовища з більшою оптичною густиною в середовище з меншою оптичною густиною (див. рис. 26.3). У цьому випадку $n_1 > n_2$, тому згідно із законом заломлення світла $\sin \alpha < \sin \gamma$. Отже, кут заломлення γ більший, ніж кут падіння α .

Розглянемо, як змінюватиметься кут заломлення світлового пучка в разі збільшення кута падіння. Спрямуємо вузький пучок світла на поверхню поділу середовищ і поступово збільшуватимемо кут падіння (рис. 26.3). Частина світла пройде через межу поділу, а частина відіб'ється. Бачимо, що заломлений пучок світла наближатиметься до межі поділу середовищ, при цьому його яскравість буде зменшуватися, а яскравість відбитого пучка світла, навпаки, буде збільшуватися. За певного кута падіння α_0 кут заломлення досягає 90° і світло повністю відбивається — заломлений пучок світла зникає, а вся світлова енергія повертається в перше середовище (див. також табл. 2). Зрозуміло, що в разі подальшого збільшення кута падіння заломлення світла не спостерігатиметься.

Таблиця 1
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
Алмаз	2,42

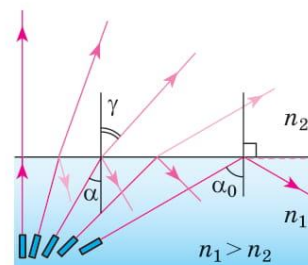


Рис. 26.3. Світло падає із середовища з більшою оптичною густиною в середовище з меншою оптичною густиною

Таблиця 2
Частина відбитої енергії під час переходу світла зі скла в повітря

Кут падіння α	Кут заломлення γ	Частина відбитої енергії, %
0°	0°	4,7
10°	16°	4,7
20°	32°	5,0
30°	51°	6,8
35°	63°	12
39°	79°	36
40°	90°	100
45°	—	100

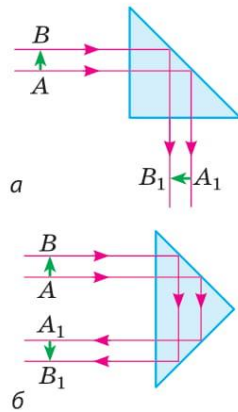


Рис. 26.4. Хід променів світла в поворотній (а) та оборотній (б) призмах повного відбивання. Зеленими стрілками позначено предмет AB і його зображення A_1B_1

Явище, коли заломлення світла відсутнє, тобто світло повністю відбивається від межі поділу із середовищем меншої оптичної густини, називають **явищем повного внутрішнього відбивання**.

Найменший кут падіння, починаючи з якого вся світлова енергія повністю відбивається від межі поділу двох прозорих середовищ, називають **граничним кутом повного внутрішнього відбивання** α_0 .

Урахувавши, що за кута падіння $\alpha = \alpha_0$ кут заломлення γ дорівнює 90° , і спираючись на закон Снелліуса $\left(\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21} \right)$, маємо: $\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}$, або $\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}$,

де n_1 і n_2 — абсолютні показники заломлення першого і другого середовищ відповідно.

Якщо світло падає із якогось прозорого середовища на межу поділу з повітрям або з вакуумом ($n_2 \approx 1$), то

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n_1},$$

де n_1 — абсолютний показник заломлення середовища.

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. Із цією метою застосовують так звані *призми повного відбивання* (див. рис. 26.4).

Найбільш інтенсивно явище повного відбивання світла використовують у створенні волоконних оптичних систем. Якщо в торець суцільної скляної трубки спрямувати пучок світла, то після багаторазового відбивання від стінок трубки світло вийде на її протилежному кінці. 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 його 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.

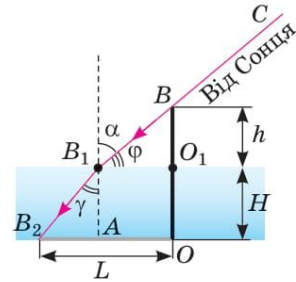
Однак найчастіше світловоди використовують як кабелі для передачі інформації. Так, порівняно зі стандартним мідним кабелем волоконно-оптичний кабель є набагато дешевшим і легшим, він практично не змінює своїх властивостей під впливом навколишнього середовища, дозволяє передавати більший обсяг інформації на великі відстані без підсилення 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, причому верхня частина стовпа піднімається над поверхнею води на 1,0 м. Обчисліть довжину тіні стовпа на дні водойми, якщо висота Сонця над горизонтом 30° .

Аналіз фізичної проблеми.

Виконаємо пояснювальний рисунок. У точці B_1 (на межі поділу повітря і води) прямолінійність поширення променя CB порушується. Довжина L тіні від стовпа OB дорівнюватиме довжині відрізка OB_2 : $L = OB_2 = B_2A + AO = B_2A + B_1O_1$. Отже, 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 . Вважатимемо, що показник заломлення води відносно повітря дорівнює абсолютному показнику заломлення води.



Дано:

$H = 2,5$ м

$h = 1,0$ м

$\varphi = 30^\circ$

$n = 1,33$

L — ?

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

Кут α падіння 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 маємо:

$B_2A = B_1A \operatorname{tg} \gamma = H \operatorname{tg} \gamma = 2,5 \text{ м} \cdot \operatorname{tg} 41^\circ = 2,17$ м.

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

Відповідь: $L = 3,9$ м.



Підбиваємо підсумки

- Зміну напрямку поширення світла при його проходженні через межу поділу двох прозорих середовищ називають заломленням світла.
- Заломлення світла підпорядковується законам Снелліуса.

1. Промінь падаючий, промінь заломлений і перпендикуляр до межі поділу середовищ, проведений із точки падіння променя, лежать в одній площині.

2. Для двох даних середовищ відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення є величиною незмінною: $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$, де n_{21} — відносний показник заломлення, який показує, у скільки разів швидкість v_1 поширення світла в першому середовищі відрізняється від швидкості v_2 поширення світла в 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 спостерігаються, коли світло проходить через межу поділу двох середовищ?
2. Який кут називають кутом заломлення?
3. Сформулюйте закони заломлення світла та доведіть ці закони, користуючись принципом Гюйгенса.
4. У чому причина заломлення світла?
5. Яким є фізичний зміст відносного та абсолютного показників заломлення світла?
6. За яких умов на межі двох середовищ спостерігається 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 № 26

1. Світло падає з повітря на скляну пластинку з паралельними гранями (рис. 1). Перенесіть рисунок до зошита, зобразіть подальший хід променя. Позначте кути падіння і кути заломлення. У якому середовищі швидкість поширення світла є більшою?
2. Визначте швидкість поширення світла в алмазі; воді; бензині.
3. Яким є кут повного внутрішнього відбивання для межі поділу середовищ: вода — повітря; алмаз — вода; скло — вода?
4. Визначте діаметр світлої круглї 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.
5. Обчисліть товщину d скляної пластинки з паралельними гранями (рис. 2), якщо після проходження пластинки світловий промінь зміщується на відстань $l = 4$ мм. Кут падіння світла на пластинку $\alpha = 45^\circ$.
6. Розгляньте рис. 3. Відстань від рибалки, що стоїть на краю берега, до човна — 10 м, відстань від краю берега до човна — 6 м. Скориставшись принципом Ферма, визначте найменший час, який знадобиться рибалці, щоб дістатися човна, якщо швидкість руху рибалки берегом 3 м/с, а озером — утричі менша.
7. Якщо світло поширюється в оптично неоднорідному середовищі, показник заломлення якого змінюється плавно від точки до точки, то напрямок поширення світла теж змінюється плавно («траєкторії» променів світла — плавно викривлені лінії). Зміну напрямку поширення світла в таких випадках зазвичай називають *рефракцією світла* (від латин. *refractio* — заломлення). Саме рефракція світла є причиною утворення міражів (рис. 4), через рефракцію світла Сонце і зорі здаються розташованими вище над горизонтом, ніж це є насправді... Дізнайтеся про оптичні явища, пов'язані з рефракцією світла в атмосфері Землі, докладніше та підготуйте короткі повідомлення.

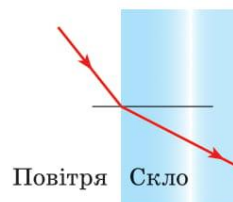


Рис. 1

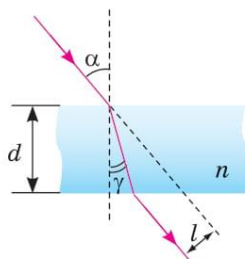


Рис. 2

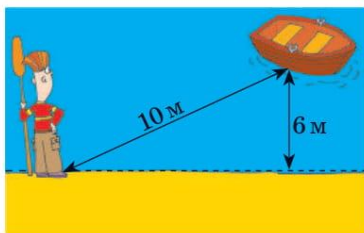


Рис. 3

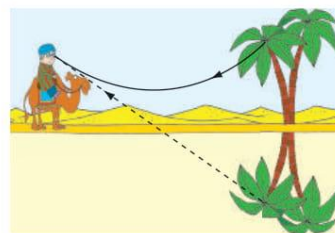


Рис. 4