

$\mu$  – коефіцієнт трення между телом и плоскостью. Требуется найти скорость  $v_k$  тела в конце спуска (рис. 7).

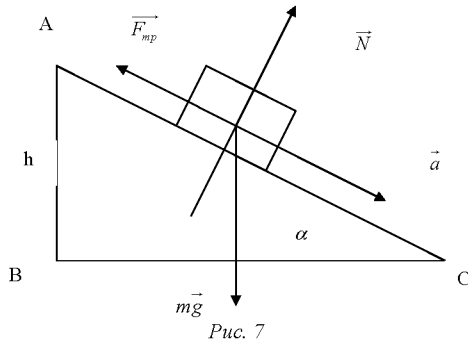


Рис. 7

Т.к. существует трение (т.е. не все силы в данной задаче консервативны), то полная механическая энергия в системе не сохраняется. Выбираем соответствующий уровень отсчета потенциальной энергии (например, т.С). Имеем

$$W_A = mgh, W_C = \frac{1}{2}mv^2, W_C - W_A = A_{mp} < 0.$$

Используя определение работы и  $F_{mp} = \mu N$ , получаем

$$v = \sqrt{2gh(1 - \mu \text{ctg} \alpha)}.$$

УДК 535:378.147.016

П.С. Атаманчук, А.О. Губанова, О.П. Паюк  
Кам'янець-Подільський державний університет

## МЕТОДИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИВЧЕННЯ ПРИНЦИПУ ГҮЙГЕНСА-ФРЕНЕЛЯ В УМОВАХ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ СКЛАДНОСТІ НАВЧАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ

Стаття присвячена методиці вивчення принципу Гюйгенса-Френеля в курсі загальної фізики для студентів вузів та учнів старших класів середньої школи, що ставить за мету досягнення результату глибокого розуміння теорії. Для цього використовується ряд задач, в яких поступово збільшується інформаційна складовая теорії коливань.

**Ключові слова:** принцип Гюйгенса-Френеля, хвильовий фронт, плоскополяризоване світло, різниця фаз електромагнітних коливань, когерентність хвиль, інтерференція.

Методична складність подання вчення про світло у значній мірі пов'язана з різнобічністю розгляду світлових явищ. Квантова природа, прямолінійне поширення світла в однорідному середовищі та його хвильові властивості свідчать про неосяжну первинну суть того явища, що людство називає "світло".

В даній статті, використовуємо методику побудови параграфів у підручнику з фізики для середньої школи О.В.Пьоришкіна. А саме – виділимо його три змістовні частини:

- опис дослідів та спостережень, що складають основу формулювання гіпотези;
- вправи, що складаються з великої кількості задач, причому задачі підібрані за принципом поступового ускладнення, пов'язаного з деталями навчального матеріалу підвищеної складності, що використовується в теорії;
- вправи закінчуються олімпіадними завданнями, які відповідають поглибленому розумінню явищ, які вивчаються;

Традиційно вивчення оптики у вищій школі складається з таких розділів: фотометрія, геометрична (лінійна) оптика, хвильова (фізична) оптика, квантова оптика.

Це формалізований підхід, бо йдеться про один і той же матеріальний об'єкт.

- Гіпотеза Гюйгенса та її пояснення:

На основі спостереження розповсюдження хвиль на поверхні води Гюйгенс сформулював такий принцип: будь-яка точка простору, до якої доходить світлове збурення (хвиля), стає джерелом вторинних сферичних хвиль, частота яких дорівнює частоті падаючої хвилі. Фронт результуючої хвилі є огинання фронтів вторинних хвиль. Фронт хвилі (хвильова поверхня) – це поверхня, яка являє собою

В качестве движущегося тела можно рассмотреть, например, произвольное тело вращения (шар, цилиндр и т.д.). В этом случае, в рамках данной модели, можно изучать закономерности вращательного движения твердого тела (в частности, понятие момента инерции).

Многие задачи можно решать разными способами. Одну и ту же задачу можно, например, решить одновременно кинематически и исходя из законов сохранения. Это также можно использовать в данном случае, чтобы некоторым образом "скрепить" данную модель, образовать из нее компактное и емкое образование. Хотелось бы еще раз отметить, что данная система не обладает той полнотой физического знания, которая потребуется, например, физику-инженеру. Такая цель здесь и не ставится. А для нефизических специальностей, – первой дело (по нашему мнению). Именно, в смысле практического освоения теоретического минимума физического знания.

Professional qualities and a cultural level of the person in many respects are defined by stability of that knowledge which it seizes during training. In given clause the example of such model of training which promotes steady fastening of base knowledge on the physicist is resulted.

**Key words:** stability, compactness.

Отримано: 18.10.2007

геометричне місце точок, в яких коливання здійснюються в однакових фазах [1, с.30, 150].

Якщо точкове джерело світла розташувати в однорідному середовищі (світло поширюється з однаковою швидкістю в усіх напрямках), то поверхні оптичних хвиль з однаковою фазою коливань мають вигляд сфер. Такі оптичні хвилі називаються сферичними. Якщо сферична хвильова поверхня значно віддалена від джерела, то невелику її частину з достатнім наближенням можна вважати плоскою. В таких випадках говорять про плоску хвилю.

За напрямком поширення сферичних або плоских хвиль в однорідному середовищі завжди беруться перпендикуляри до хвильового фронту. Вздовж перпендикулярів до хвильового фронту поширюється енергія випромінювання. В променевій оптиці напрямком, вздовж якого поширюється енергія випромінювання, ми називаємо променями і користуємося ними для знаходження положення та розміру зображення. Співпадання нормалей до хвильової поверхні з променями дозволяє і в хвильовій оптиці користуватися поняттям променя. Це надзвичайно спрощує розрахунки величини фази коливання в будь-якій точці простору, що досягається хвилею в кожний момент часу. Поширенню сферичної хвилі відповідає гомоцентричний пучок променів, що сходяться або розходяться (рис. 1, а), а поширенню плоскої хвилі – паралельний (рис. 1, б) [4, с.73].

Принцип Гюйгенса дає можливість визначити положення хвильового фронту для будь-якого моменту часу. Для цього Гюйгенс ввів поняття вторинних елементарних сферичних хвиль. Джерелами вторинних

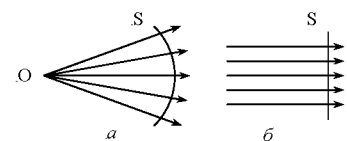


Рис. 1. Переріз сферичного (а) і плоского (б) фронтів хвилі: S – поверхня фронту хвилі

хвиль являються всі точки середовища, яких досягнула перша світлова хвиля. Від цих джерел вторинні сферичні хвилі поширюються зі швидкістю, що обумовлюється властивостями даного середовища [4, с.74].

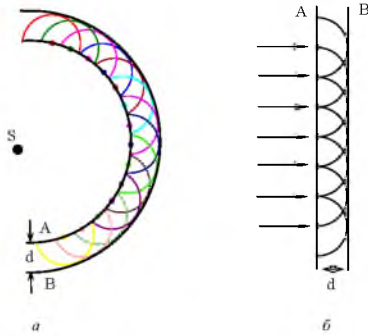


Рис. 2. Побудова (за Гюйгенсом) нового положення хвильового фронту для сферичної (а) та плоскої (б) хвилі

Розглянемо поширення світла в ізотропному середовищі, в якому швидкість світла за всіма напрямками однакова. Нехай в деякий момент часу хвильова поверхня, або фронт хвилі, знаходилась в положенні А. (рис.2, а, б). Всі точки поверхні А починають одночасно створювати коливання зі швидкістю світла  $c$  (ці вторинні хвилі представлені на малюнку малими півколами). В результаті через час  $t$  коливання поширюються на відстань  $d = c \cdot t$ , що, очевидно, буде відповідати переміщенню всього фронту в положення В, що відстає від А на ту ж відстань  $d$ . Фронт хвилі В, за означенням, повинен проходити через усі точки простору, що знаходяться в одній фазі: а значить, фронт дотикається до всіх сфер радіусом  $d$ , що являють собою хвильові поверхні через час  $t$ . Отже, хвильовим фронтом, таким чином, буде поверхня, що огинає поверхні вторинних хвиль, які виникають у просторі, в якому поширюється світло.

Світлові промені будуть розходитися по радіусам від точки S.

В ізотропному середовищі світловими променями будуть нормалі до хвильової поверхні [2, с.102].

При побудові хвильової поверхні за методом Гюйгенса можна обмежитися нанесенням на рисунок тільки тих ділянок сферичних вторинних хвиль, які потрібні для побудови огинаючої зі сторони, в яку поширюються первинні хвилі. Ця огинаюча називається зовнішньою.

Гюйгенс застосував свій метод для пояснення поширення світлових хвиль, розглядаючи їх як пружні хвилі в гіпотетичному середовищі – світовому ефірі. Через 150 років Френель доповнив принцип Гюйгенса, вказавши на те, що вторинні хвилі в результаті накладання одне на одного будуть помітні лише на зовнішній огинаючій із хвильових поверхонь, а в решті точок взаємознищуються. Якщо ж цілісність хвильового фронту, на якому розташовані центри вторинних хвиль, порушена перешкодою, що затримує частину хвилі, то в точках поблизу межі геометричної тіні вторинні хвилі можуть при накладанні і не знищуватися, а заходити в область геометричної тіні. Таким чином, виявляється, що хвилі можуть огинати перешкоди – прямолінійність поширення хвиль порушується. Таке явище легко спостерігати на поверхні води, якщо на шляху хвиль знаходиться перешкода. В такому випадку хвилі проникають в область геометричної тіні. Це явище називається дифракцією [3, с.35].

- Розглянемо задачу, розв'язок якої блискуче ілюструє застосування принципу Гюйгенса.

Задача №1. Скляна плоскопаралельна скляна посудина встановлена між двома тонкими збірними лінзами перпендикулярно до оптичної осі лінз (рис. 3). Точкове джерело світла S розташоване в фокусі лінзи L1. На екрані E спостерігається зображення джерела, коли посудина порожня. Знайти зображення точки S, якщо посудину заповнити рідиною, показник заломлення якої змінюється за законом  $n = n_0 + \alpha h$  (рис. 3). Товщина шару рідини рівна D, фокусна відстань лінзи L2 рівна F. Зміну показника заломлення з висотою вважати малою в межах діаметру світлового пуч-

ка, стінки скляної посудини вважаємо нескінченно тонкими [5, с.114].

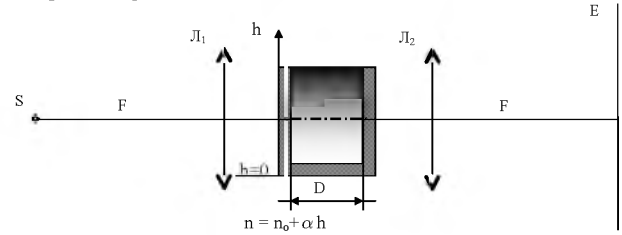


Рис. 3. Оптична схема дослід (збільшення густини забарвлення ілюструє збільшення показника заломлення)

Розв'язання. Для розв'язання задачі, спершу, необхідно побудувати зображення джерела світла, коли відсутня посудина. Вважаємо, що джерело світла S точкове і розташоване в фокусі лінзи L1. Після проходження лінзи L1 світлові промені будуть паралельними між собою і хвильовим фронтом буде площина перпендикулярна головній оптичній осі. При проходженні лінзи L2, пучок паралельних променів перетвориться на збіжний, який збереться у фокусі лінзи L2 – точка S'. Побудова зображення, виконана у відповідності з законами геометричної оптики та приведена на рис. 4.

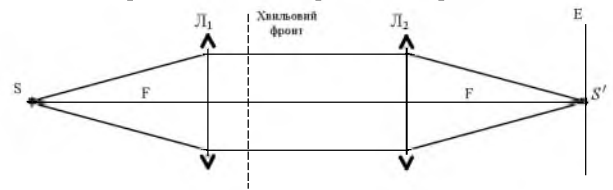


Рис. 4. Оптична схема дослід. В просторі між лінзами кювета відсутня. Пунктиром зображений переріз плоского хвильового фронту

Між лінзами L1 і L2 в однорідному середовищі швидкість переміщення хвильового фронту однакова в усіх точках перерізу світлового пучка. Якщо хвильовий фронт (за означенням) – це поверхня, в усіх точках якої світлова хвиля має однакову фазу, то швидкість поширення певної фази однакова в усьому перерізі пучка. В неоднорідному середовищі, при внесенні рідини з різним показником заломлення, швидкість поширення хвилі буде залежати від показника заломлення середовища. Тому у верхній частині посудини, де рідина має найбільший показник заломлення, фаза світлової хвилі відставатиме від фази світлової хвилі у нижній частині посудини, де показник заломлення менший. Отже, напрямок хвильового фронту по відношенню до головної оптичної осі лінз буде змінюватися в залежності від відстані, що проходять промені в рідині. Коли нижній промінь пройде шар рідини L, верхній промінь пройде відстань рівну L' (рис. 5), яку можна розрахувати: при  $h = 0$ , показник заломлення рідини  $n_0$ , швидкість світла на такій

висоті  $V = \frac{c}{n_0}$ , час проходження відстані L:  $t = \frac{L n_0}{c}$ .

висоті  $h \neq 0$  за такий самий час промінь пройде відстань L', яку можна розрахувати:

$$L' = V' \cdot t = V' \cdot \frac{L n_0}{c}, \text{ де } V' = \frac{c}{n_0 + \alpha h}.$$

Хвильовий фронт нахилиться – цей нахил зображено на рисунку 5.

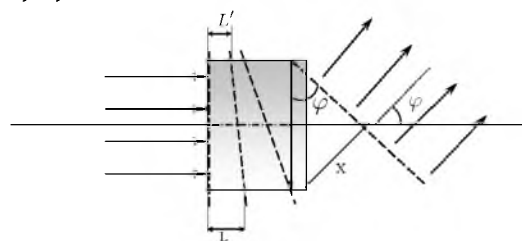


Рис. 5. Зміна нахилу перерізу хвильового фронту в залежності від відстані, що проходять світлові промені в неоднорідному середовищі

Зі збільшенням відстані L, кут нахилу хвильового фронту буде зростати. Коли нижній промінь пройде відстань D, він вийде з посудини і згідно принципу Гюйгенса

точка його виходу стане джерелом сферичних світлових хвиль, які поширюються у повітрі з швидкістю світла  $c$ .

За той час, що верхній промінь проходить відстань  $D$  – товщину посудини (оптичний шлях  $nD$ ), нижній вже встигає вийти з посудини і пройти певну відстань поза посудиною  $X$ . Отже,

$$\frac{nD}{c} = \frac{n_0D + X}{c} \Rightarrow nD = n_0D + X,$$

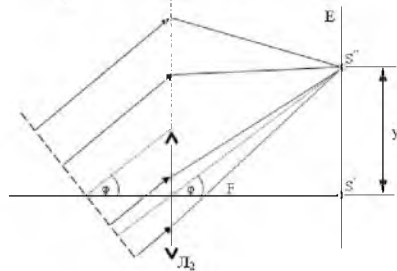
$$(n_0 + \alpha h)D = n_0D + X, \quad n_0D + \alpha hD = n_0D + X,$$

$$\alpha hD = X, \quad \frac{X}{h} = \alpha D \Rightarrow \sin \varphi = \alpha D.$$

На *рисунку 5* відрізок  $X$  перпендикулярний хвильовому фронту в момент часу, коли верхній промінь виходить з посудини. Напрямок поширення світла складає також кут  $\varphi$  з оптичною віссю лінз. На лінзу  $L_2$  потрапляє паралельний пучок променів, напрямлених під кутом  $\varphi$  до оптичної осі. Зображення  $S'$  (*рис. 6*) зміститься вгору на відстань  $y = S'S''$ , яку розрахуємо наступним чином

$$y = F \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

Якщо кут  $\varphi$  малий, то  $\operatorname{tg} \varphi \approx \sin \varphi = \alpha D$ ;  $y = F \cdot \alpha D$ .



**Рис. 6.** Схема розрахунку положення зображення  $S''$ . Промінь побудови проходить через центр лінзи без заломлення

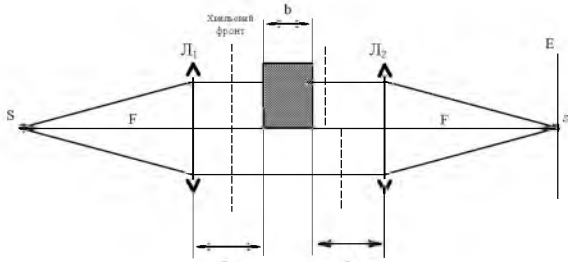
- Ускладнення задачі з введенням понять, що відповідають поглибленому вивченню матеріалу (рівень задач олімпіадного характеру).

В розглянутій задачі про нахил плоского фронту хвилі використані лише геометричні методи побудови, та врахована різна швидкість поширення світла в залежності від показника заломлення  $n$ .

Далі проведемо дуже простий уявний експеримент. Замість кювети з речовиною, показник якої змінюється з висотою, помістимо пластинку скла, але так, щоб вона перекривала лише верхню половину світлового пучка.

Для аналізу складу світлових променів, що збираються лінзою  $L_2$  в точці  $S'$  використаємо поняття оптичного шляху. Половина променів, що проходять між лінзами (нижня), долає оптичний шлях  $D_n = 2a + b$ , друга половина променів (верхня) –  $D_a = 2a + bn$ , де  $n$  – показник заломлення скла. Різниця ходу між променями верхньої половини та нижньої половини складає:  $D = D_a - D_n$ . Підставимо  $D_n$   $D_a$  і отримаємо:  $D = b(n - 1)$ .

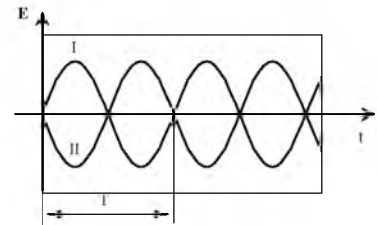
Така різниця ходу свідчить про те, що напівплощина, що є фронтом верхньої половини світлового пучка, буде зміщена відносно напівплощини, що є фронтом нижньої половини пучка, а весь фронт, як поверхня рівної фази хвилі, буде зображатися двома півплощинами (*рис. 7*) зміщеними одна відносно одної на величину  $D$  вздовж оптичної осі.



**Рис. 7.** Оптична схема досліду з використанням скляної пластинки, що збільшує оптичний шлях  $\lambda/2$

За умови, що  $D = b(n - 1) = \lambda/2$  (при монохроматичному світлі), в точку  $S'$  збиратимуться промені, з нижньої і

верхньої половин пучка, зміщені на половину довжини хвилі, що відповідає різниці фаз  $\pi$ . З верхньої та нижньої половин пучка виберемо два, симетричних відносно оптичної осі, промені (I) і (II).



**Рис. 8.** Додавання коливань в т.  $S'$

Інтенсивність світлових променів пропорційна квадрату напруженості векторів електричного поля в електромагнітній хвилі. Напруженість векторів електричного поля в цих променях позначимо  $E_1$  і  $E_2$ . На *рисунку 8* покажемо зміну з часом величини вектора  $E_1$  та  $E_2$ .

Внаслідок додавання таких променів, відбуватиметься взаємне додавання векторів  $E_1$  і  $E_2$ , які рівні за модулем і протилежно направлені, їх сума дорівнюватиме нулеві. Слід зазначити, що для отримання інтерференційної картини, досвід необхідно проводити, використовуючи плоскополяризоване світло. Тобто після джерела світла  $S$  треба розташувати поляризатор, який би перекривав увесь світловий пучок. При цьому на екрані в фокальній площині лінзи  $L_2$  спостерігатимемо темну точку  $S'$ , тобто явище інтерференційного мінімуму в точці  $S'$ . Дві світлових хвилі, які мають однакову частоту – однакову довжину хвилі в даному середовищі і однакову площину коливання векторів  $E$  – поляризовані в одній площині, що потрапляють в одну точку простору з сталим зсувом фаз називаються **когерентними**. Тільки для когерентних хвиль теоретично може існувати інтерференційна картина.

Доречно з введенням поняття "оптичний шлях" посприяти на оптичний принцип Ферма: в неоднорідному оптичному середовищі світловий промінь проходить з точки  $A$  в точку  $B$  таким чином, що час цього проходження найменший. Використовуючи цей принцип, можна підтвердити досліди спостереження відбивання та заломлення світла на межі двох середовищ з різними показниками заломлення.

Розглянуті задачі дозволяють проілюструвати як і геометричний, так і хвильовий зміст одного з основних принципів, на яких ґрунтується вчення про світло. Їх можна застосовувати як дієвий спосіб викладання навчального матеріалу у середній та вищій школах.

Стаття є ілюстрацією використання на практиці методики поступового збільшення інформаційної частини. Такий спосіб подання теорії, а саме з використанням як теорії так і пояснення розв'язків приведених задач може бути використаний при складанні курсу "Фізика" для вивчення з застосуванням методики дистанційного навчання.

Для цього треба тільки поставити запитання по теорії та зробити аналіз можливих помилок у відповідях студентів чи учнів.

#### Список використаних джерел:

1. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976 г. – 928 с.
2. Путилов К.А., Фабрикант В.А. Курс фізики. – Т. 3: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд. – М.: Физматгиз, 1963 г. – 636 с.
3. Чечулин А.А. Волновые процессы. Оптика. Элементы атомной и ядерной физики: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Физматгиз, 1959 г. – 408 с.
4. Борбат А.М. Физика: Оптика. Атомная и ядерная физика. – Ч. 3: Пособие для учащихся средних школ. – К.: Радянська школа, 1973. – 240 с.
5. Сборник задач по физике: Учебное пособие / Под ред. С.М.Козела. – М.: Физматгиз, 1983. – 288 с.

The method of studying the wave theory in optics is described. Some tasks are solved by Guignens principle with extending information part of theory.

**Key words:** wave front, plane polarized wave, difference wave phase, interference

Отримано: 1.10.2007