

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-енергетичний факультет

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

Фізика.

Модулі 6,7 «Хвильова оптика. Квантова природа світла»,
методичні рекомендації для виконання практичних робіт здобувачами
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти ОПП «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка» спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

Миколаїв
2023

УДК 531.19
Ф48

Рекомендовано до друку науково-методичною комісією інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету від 07.12.2023, протокол № 4

Укладачі:

Вахоніна Лариса — канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

Рецензенти:

Грубань Василь — канд. тех. наук доцент кафедри тракторів та сільськогосподарського виробництва, Миколаївський національний аграрний університет.

Ставинський Андрій — д-р техн. наук, професор, зав. кафедрою електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

© Миколаївський національний
аграрний університет, 2023

Зміст

Основні закони і формули.....	4
1. Геометрична оптика.....	5
1.1 Закони відбивання і заломлення світла.....	6
1.2 Плоскі і сферичні дзеркала.....	9
1.3 Правила побудови зображень у сферичному дзеркалі.....	11
1.4 Лінзи.....	11
2. Хвильова оптика. Основи квантової теорії.....	14
2.1 Електромагнітне поле.....	14
2.2 Електромагнітні хвилі.....	16
2.3 Енергія і імпульс електромагнітної хвилі.....	18
2.4 Світлові хвилі.....	19
2.5 Поляризація світла.....	20
2.6 Основи квантової теорії.....	22
2.7 Квантова гіпотеза Планка.....	23
2.8 Фотоелектричний ефект.....	24
2.9 Використання фотоефекту.....	26
2.10 Тиск світла. Ефект Комптона.....	27
2.11 Основи фотометрії.....	28
2.12 Закони освітленості. Фотометр.....	31
Приклади розв'язування задач.....	33
Задачі для самостійного розв'язку.....	64
Таблиця задач.....	67
Задачі для контрольної роботи.....	68
Список використаних джерел.....	77

Основні закони і формули

Закон заломлення світла	$\sin \varepsilon / \sin \varepsilon' = n_{21}$
Відносний показник заломлення	$n_{21} = n_2 / n_1$
Абсолютний показник заломлення	$n = c / v$
Формула лінзи	$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}$
Оптична сила лінзи	$\Phi = 1 / f$
Оптична сила двох зміщених лінз	$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$
Лінійне збільшення лінзи	$\beta = b / a = y' / y$
Збільшення лупи	$\beta = L / f$
Збільшення мікроскопа	$\beta = \frac{lL}{f_{ok} f_{ob}}$
Освітленість	$E = \Phi / S$
Освітленість, що створюється точковим джерелом світла	$E = \frac{I \cos \alpha}{r^2}$
Формула дифракційної решітки	$d \sin \varphi = k \lambda$
Постійна дифракційної ґратки	$d = a + b = 1 / N$
Закон Брюстера	$\operatorname{tg} \alpha_B = n_{21}$
Закон Стефана — Больцмана	$R_0 = \sigma T_4$
Закон Вина	$\lambda_m = \frac{C'}{T}$
Енергія кванта (закон Планка)	$\varepsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$
Формула Ейнштейна для фотоефекта	$\varepsilon = A + \frac{mv^2}{2}$
Червона границя фотоефекта	$\nu_{\Gamma P} = \frac{A}{h}; \lambda_{\Gamma P} = \frac{hc}{A}$
Закон взаємозв'язку маси і енергії	$E = mc^2$
Енергетична освітленість, опроміненість	$E_e = E / (St)$
Тиск світла	$p = \frac{E}{cSt} (1 + \rho)$
Серіальна формула для атома водню	$\nu = \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right)$
Період напіврозпаду	$T_{1/2} = \frac{\ln}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$
Активність радіоактивного ізотопу	$a = \lambda N = N \frac{0,693}{T_{1/2}}$

Дефект маси ядра	$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_\beta$ $\Delta m = Zm_{\frac{1}{1}\text{H}} + (A - Z)m_n - m_a$
Енергія зв'язку ядра	$E_{\text{св}} = \Delta mc^2, E_{\text{св}} = 931\Delta m$
Питома енергія зв'язку	$\varepsilon = E_{\text{св}} / A$

1. ГЕОМЕТРИЧНА ОПТИКА

Геометричною оптикою називається частина оптики, в якій вивчаються закони поширення світла в прозорих середовищах на основі уявлень про нього як про сукупність світлових променів.

Світловий промінь – це лінія, яка вказує напрямок поширення світлової енергії. Поширення кожного променя відбувається незалежно від інших променів і підпорядковується законам геометричної оптики: прямолінійному поширенню, відбиванню і заломленню.

Геометрична оптика діє доти, доки довжина хвилі достатньо мала в порівнянні з іншими розмірами; крім того, предмети, які освітлюються променями, не повинні бути дуже віддаленими від джерела світла.

Поширення променів світла підпорядковане принципу оборотності: промінь, який виходить із кінцевої точки в зворотному напрямку, буде поширюватись по тій самій траєкторії і повернеться в точку виходу. Принцип оборотності світлових променів задовольняє всі закони геометричної оптики.

Важливе значення в геометричній оптиці має поняття зображення: зображенням точкового джерела називають точку, в якій перетинаються промені від цього джерела після проходження ними оптичної системи.

Якщо промені, які пройшли оптичну систему, утворюють пучок, який збігається, то зображення називають дійсним; коли промені розходяться від уявної точки, яка лежить поза оптичною системою, зображення називають уявним.

Закон прямолінійного поширення світла стверджує, що в оптично однорідному середовищі або у вакуумі світло поширюється прямолінійно, тобто промінь світла являє собою пряму лінію.

При падінні світла на межу поділу двох середовищ частина світла (а інколи вся світлова енергія) відбивається знову в перше середовище. Якщо друге середовище прозоре, то частина світла проходить у дане середовище і змінює напрямок поширення променя, тобто відбувається заломлення світла.

1.1. Закони відбивання і заломлення світла

Кут α між напрямком падаючого променя і нормаллю до межі поділу двох середовищ, яка проведена в точку падіння, називають кутом падіння. Кут γ між напрямком відбитого променя і нормаллю до межі поділу двох середовищ, яка проведена в точку падіння, називають кутом відбивання. Кут β між заломленим променем і нормаллю до межі поділу називають кутом заломлення (рис.1).

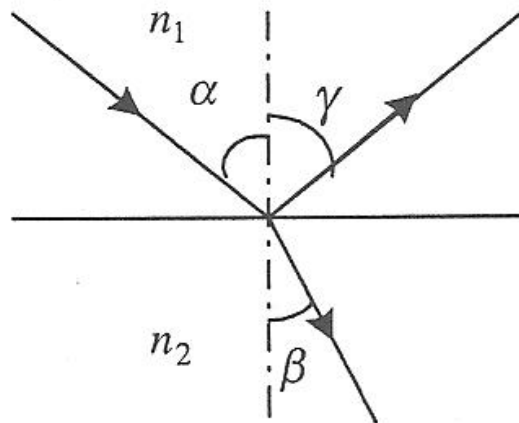


Рис. 1.

Закони відбивання світла були відкриті в III ст. до н.е. грецьким вченим Евклідом:

1. Падаючий і відбитий промені та нормаль до межі поділу двох середовищ лежать в одній площині;

2. Кут падіння α дорівнює куту відбивання γ .

Експериментально закони заломлення світла були встановлені голландським фізиком В. Снелліусом (1580-1626) лише в першій чверті XVII ст., тобто майже на 2000 років пізніше законів відбивання світла. Сучасну форму цих законів встановив французький вчений Р.Декарт (1596-1650)

1) падаючий і заломлений промені і нормаль, проведена до межі поділу двох середовищ, лежать в одній площині;

2) відношення синуса кута падіння α до синуса кута заломлення β є величиною сталою і залежить тільки від оптичних властивостей середовищ, які межують між собою; його називають відносним показником заломлення n_{21} другого середовища відносно першого:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (1)$$

де n_1 і n_2 - **абсолютні показники заломлення першого і другого середовища**. Якщо промінь світла падає із вакууму в будь-яке

середовище, то відношення $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$ називають абсолютним

показником заломлення даного середовища.

Абсолютний показник заломлення речовини дорівнює відношенню швидкості світла у вакуумі до швидкості світла в даному середовищі,

тобто $n = \frac{c}{g}$, тоді

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{g_1}{g_2}. \quad (2)$$

Отже, **відносний показник заломлення дорівнює відношенню швидкості світла в середовищі, в якому світло поширюється до заломлення, до швидкості світла в середовищі, в яке воно переходить після заломлення.**

Згідно з теорією Максвелла числове значення швидкості поширення світлових (електромагнітних) хвиль залежить від електричних і магнітних властивостей середовища, і її числове значення визначається за формулою

$$g = \frac{1}{\sqrt{\mu_c \varepsilon_c}}. \quad (3)$$

Оскільки $\mu_c = \mu \mu_0$ і $\varepsilon_c = \varepsilon \varepsilon_0$, то

$$g = \frac{1}{\sqrt{\mu \varepsilon} \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}. \quad (4)$$

Для вакууму $c = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$. Порівнявши формули (3) і (4), отримаємо

$$g = \frac{c}{\sqrt{\mu \varepsilon}} \Rightarrow \frac{c}{g} = \sqrt{\mu \varepsilon}. \quad (5)$$

Оскільки $n = c/g$, то $n = \sqrt{\mu \varepsilon}$. Необхідно пам'ятати що діелектрична проникність середовища, яку можна знайти за формулою (5), не збігається з діелектричною проникністю того самого середовища ε_c , що розглядається в електростатиці.

При переході світла з оптично густішого середовища в оптично менш густе можна спостерігати цікаве явище: *починаючи з деякого кута падіння вся світлова енергія відбивається від межі поділу цих середовищ*

у середовище більш оптично густіше. Це явище називається повним внутрішнім відбиванням.

Найменший кут, при якому відбувається повне внутрішнє відбивання, називають граничним кутом повного відбивання:

$$\frac{\sin a_{\text{сп}}}{\sin \beta_0} = \frac{\sin a_{\text{сп}}}{\sin 90^\circ} = \frac{n_1}{n_2} \Rightarrow \sin a_{\text{сп}} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (6)$$

Враховуючи, що показник заломлення води при кімнатній температурі дорівнює 1,33, отримуємо значення граничного кута повного внутрішнього відбивання для води (для випадку, коли другим середовищем є повітря і $n_2 = 1$):

$$\sin a_{\text{сп}} = \frac{1}{1,33} = 0,752 \text{ або } a_{\text{сп}} = 48^\circ 45'.$$

Для кожної речовини існує власний граничний кут повного внутрішнього відбивання. Чим більша оптична густина речовини (тобто, чим більший його абсолютний показник заломлення), тим менший цей кут.

1.2. Плоскі і сферичні дзеркала

Побудова зображення в плоскому дзеркалі базується на використанні закону відбивання світла. Нехай над плоским дзеркалом знаходиться точкове джерело світла S , що освітлює це дзеркало (2).

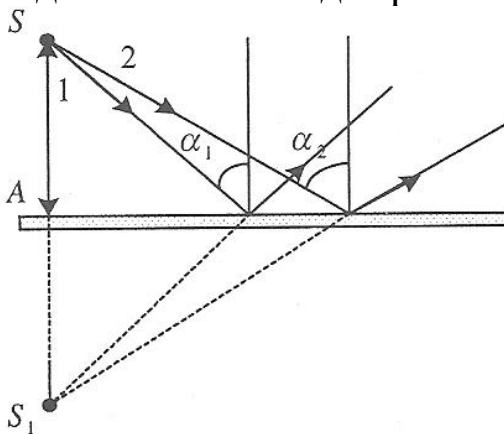


Рис. 2.

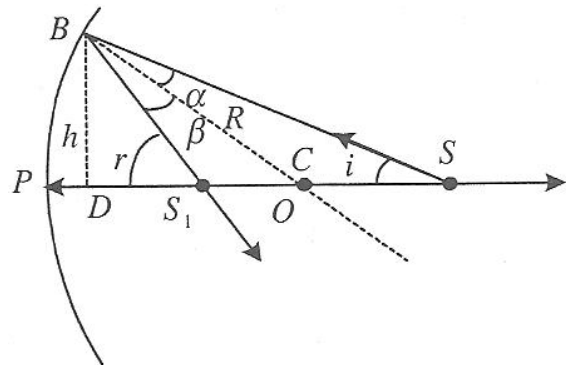


Рис. 3.

Із всього світлового потоку виберемо два промені 1 і 2, які падають на дзеркала під різними кутами - α_1 і α_2 . Після відбивання від дзеркала ці промені розходяться. Продовжені промені перетинаються в точці S_1 , яка знаходиться по інший бік дзеркала. Якщо будемо дивитися на дзеркало, то нам здаватиметься, що промені 1 і 2 виходять із цієї точки,

неначе там знаходиться джерело світла. Відповідно точка S_1 сприймається нами як зображення точкового джерела S .

Зображення, яке отримується за рахунок перетину не самих променів, а їх продовжень, називають уявним.

Така назва пов'язана з тим що в точку S_1 , де бачимо світлову точку, не потрапляє світлова енергія. Якщо в точку S_1 помістити екран, то на ньому не буде зображення точки S . Це характерна властивість уявного зображення.

Отже, в плоскому дзеркалі отримується уявне зображення світлової точки S , яке розміщено симетрично їй відносно дзеркала в точці S_1 .

Геометрична оптика вивчає прийоми побудови зображень різних джерел і розрахунки оптичних пристроїв і приладів, які призначені переважно для перетворення світлових променів. Одним із таких приладів є сферичне дзеркало. Введемо позначення: P - полюс дзеркала (вершина сферичного сегмента); O — центр сфери, або центр кривизни (геометричний центр сферичної поверхні радіуса R); PO — головна оптична вісь дзеркала (нормаль до дзеркала, яка проходить через полюс і центр сфери) (рис.3).

Виведемо формулу сферичного дзеркала.

Точкове джерело світла знаходиться на головній оптичній осі вгнутого сферичного дзеркала (рисунок 3) на відстані $d = PS$ від полюса. Зображення буде в точці S_1 ($PS_1 = f$ - відстань від полюса до зображення).

Позначимо: i - кут падіння променя SB до головної оптичної осі; r - кут нахилу від відбитого променя до головної оптичної осі; γ - кут нахилу осі BC . Нехай $BD = h$. Кут γ є зовнішнім до трикутника BOS , тому $\gamma = \alpha + i$. Аналогічно, $r = \beta + \gamma$. Тоді $2\gamma = i + r$.

Виділимо паралельно до головної оптичної осі вузький (параксіальний) пучок променів. Кути i, γ, r досить малі, тому синуси можна замінити кутами, а довжиною відрізка PD знехтувати. Тоді

$$i \approx \sin i \approx \operatorname{tg} i = \frac{h}{d}; \quad r \approx \sin r \approx \operatorname{tg} r = \frac{h}{f}; \quad \gamma \approx \sin \gamma \approx \operatorname{tg} \gamma = \frac{h}{R}.$$

Оскільки $2\gamma = i + r$, то підставивши вирази для кутів i, γ, r , отримаємо

$$2\frac{h}{R} = \frac{h}{d} + \frac{h}{f} \Rightarrow \frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{2}{R}. \quad (7)$$

Формула (7) справедлива і для вгнутого, і для опуклого дзеркала.

Промені, що падають на дзеркало до головної оптичної осі, після відбиття збираються в одній точці, яка називається *головним фокусом F сферичного дзеркала*.

Знайдемо відстань від головного фокуса до полюса дзеркала P . Ця відстань називається *головною фокусною відстанню* і позначається буквою F . Нехай джерело світла знаходиться на нескінченності ($d = \infty$).

У цьому випадку $\frac{1}{\infty} + \frac{1}{F} = \frac{2}{R} \Rightarrow F = \frac{R}{2}$. Отже,

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}. \quad (8)$$

Поверхня, яка проведена через точку F і перпендикулярна до головної оптичної осі, називається *фокальною площиною*. Вона є геометричним місцем нескінченної множини фокусів.

1.3. Правила побудови зображень у сферичному дзеркалі

Для побудови зображення необхідно побудувати окремі точки предмета, а потім з'єднати їх.

Для побудови краще використовувати ті промені, хід яких відомий:

- *промінь, який проходить вдовж головної оптичної осі, після відбивання від дзеркала повертається вздовж оптичної осі;*
- *промінь, який проходить паралельно головній оптичній осі, після відбивання проходить через головний фокус;*
- *промінь, який проходить через головний фокус, після відбивання проходить паралельно головній оптичній осі;*
- *промінь, який падає в полюс дзеркала під кутом α , відбивається симетрично до головної оптичної осі під тим самим кутом α .*

1.4. Лінзи

Лінза — це прозоре тіло, яке обмежене з обох сторін сферичними поверхнями.

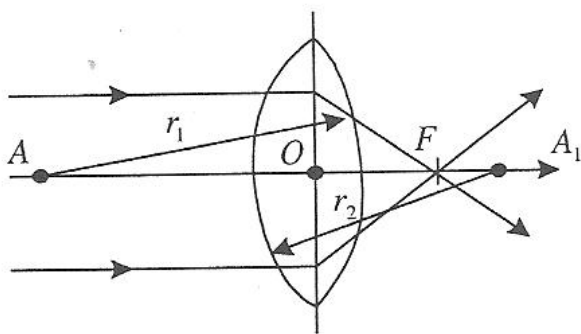


Рис. 4. а

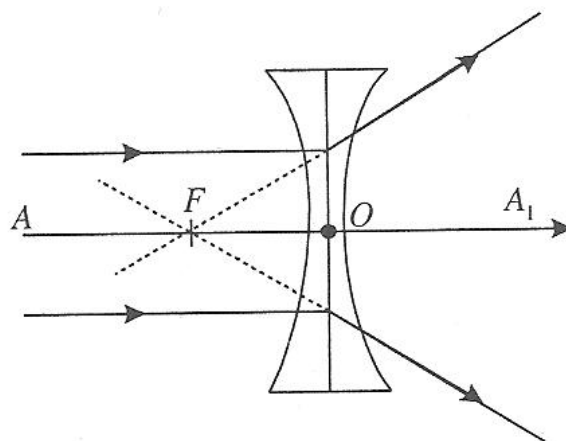


Рис. 4. б

Пряму AA_1 , яка проведена через центри сферичних поверхонь, називають головною оптичною віссю лінзи; перетин цієї осі з тонкою лінзою розглядають як одну точку і називають *оптичним центром лінзи*. Довільна пряма, яка проведена через оптичний центр під кутом до головної осі, називається побічною оптичною віссю.

Промені, які падають на лінзу паралельно головної оптичної осі, після заломлення відхиляються в бік головної осі і збираються на ній. Таку лінзу називають збіркою лінзою (рисунок 4, а), а точку перетину F - *головним фокусом лінзи*. Якщо паралельні промені після заломлення розходяться від головної осі, таку лінзу називають розсіювальною (рисунок 4, б), а точку перетину продовжень променів — *головним фокусом розсіювальної лінзи* (фокус уявний).

Відстань від фокуса до лінзи називається фокусною відстанню і позначається буквою F . Величину яка обернена фокусній відстані, називають оптичною силою лінзи: $D = \frac{1}{F}$. Якщо F виразити в метрах, то D буде вимірюватись в діоптріях. *Діоптрія — це оптична сила такої лінзи, головна фокусна відстань якої дорівнює одному метру*. Для збіркої лінзи D і F додатні, для розсіювальної — від'ємні.

Оптична сила лінзи визначається кривизною її поверхонь, а також показником заломлення її речовини відносно навколишнього середовища і може бути обчислена за формулою

$$D = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (9)$$

де R_1 і R_2 - радіуси сферичних поверхонь лінзи, а n - показник заломлення речовини лінзи відносно середовища, в якому знаходиться ця лінза. При обчисленнях числове значення R для випуклих поверхонь лінзи вважається додатним, а для ввігнутої - від'ємним.

При $n < 1$, тобто коли речовина лінзи є середовищем, оптично менш густішим, ніж навколишнє середовище, випуклі лінзи будують розсіювальними, а ввігнуті — збірними.

Пучок паралельних променів, який падає під малим кутом до головній осі, збирається після заломлення в точці, яка знаходиться у фокальній площині лінзи, тобто площині, що проведена через головний фокус.

Для побудови зображення вибирають такі промені, хід яких після заломлення відомий:

- промінь, який падає на лінзу паралельно головній оптичній осі, проходить після заломлення через головний фокус лінзи;
- промінь, який падає на лінзу паралельно побічній оптичній осі, проходить після заломлення через точку перетину цієї осі з фокальною площиною;
- промінь, що проходить через головний фокус лінзи, після заломлення проходить паралельно головній оптичній осі;
- промінь, що проходить через оптичний центр лінзи, не заломлюється.

Побудову зображення точки, яка знаходиться на головній осі, і предмета розміром AB показано на рисунку 5, а-г.

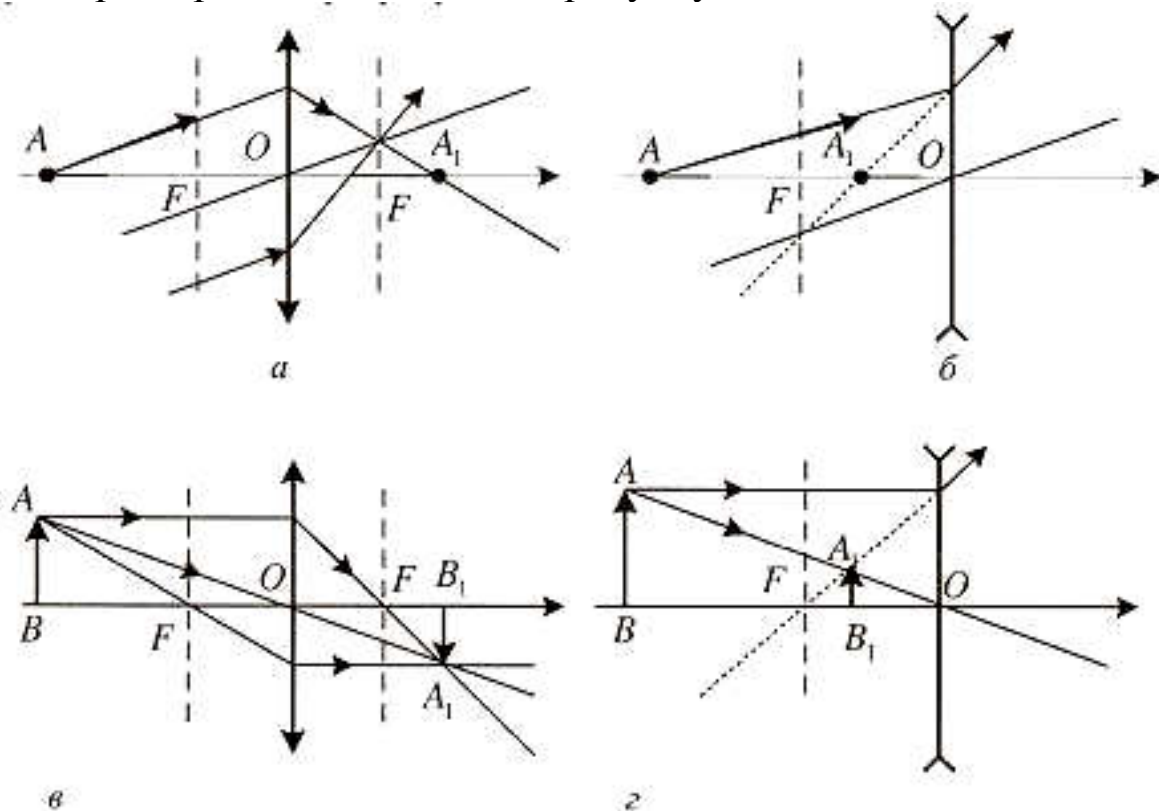


Рис. 5.

Для виведення формули точної лінзи — співвідношення, яке зв'язує радіуси кривизни R_1 і R_2 поверхонь лінзи з відстанями d (відстань між предметом і оптичним центром лінзи) і f (відстань між оптичним центром лінзи і зображенням), використаємо принцип Ферма (П. Ферма (1601-1665) - французький математик і фізик), або принцип найменшого часу:

дійсний шлях поширення світла (траєкторія променя світла) є шлях, для проходження якого світлу необхідний мінімальний час у порівнянні з довільним уявленим шляхом між тими самими точками.

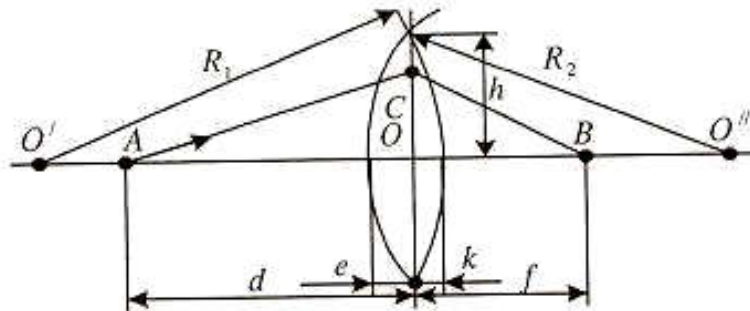


Рис. 6.

Розглянемо дві траєкторії променя світла (рис. 6) — пряму, яка з'єднує точки A і B (промінь AOB), і траєкторію, що проходить через край лінзи (промінь ACB), використавши умову рівності часу проходження світла по цих траєкторіях.

Час проходження світла по траєкторії AOB

$$t_1 = \frac{d + n(e + k) + f}{c},$$

де n - абсолютний показник заломлення речовини, з якої виготовлена лінза. Час проходження світла по траєкторії ACB становить

$$t_2 = \frac{\sqrt{(d + e)^2 + h^2} + \sqrt{(f + k)^2 + h^2}}{c}.$$

Оскільки $t_1 = t_2$, $h \ll (d + e)$, $h \ll f + k$, $e \ll d$ і $k \ll f$, то

$$(n - 1)(e + k) = \frac{h^2}{2} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{f} \right).$$

Враховуючи, що $e = \frac{h^2}{2R_2}$ і $k = \frac{h^2}{2R_1}$, отримуємо

$$(n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}. \quad (10)$$

Вираз (16.10) являє собою формулу тонкої лінзи. Враховуючи, що

$D = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$, формулу лінзи записуємо у вигляді

$$\pm \frac{1}{F} = \pm \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f}. \quad (11)$$

Для розсіювальної лінзи f і F від'ємні.

2. ХВИЛЬОВА ОПТИКА. ОСНОВИ КВАНТОВОЇ ТЕОРІЇ

2.1. Електромагнітне поле

Електромагнітне поле. Рівняння Максвелла

У 60-х роках XIX століття Джеймс Клерк Максвелл (1831-1879) створив єдину теорію електричних і магнітних явищ.

В основі теорії електромагнетизму - чотири рівняння Максвелла.

Перше рівняння Максвелла: при незмінному положенні зарядів всередині вибраної замкненої поверхні повний потік електричного поля через цю поверхню залишається одним і тим самим:

$$\Sigma \phi_e = \frac{1}{\varepsilon_0} (q_1 + q_2 + \dots),$$

де $\Sigma \phi_e$ – повний потік електричного поля через довільну замкнену поверхню; $(q_1 + q_2 + \dots)$ – сума зарядів всередині цієї поверхні;

ε_0 - електрична стала.

Друге рівняння Максвелла описує явище електричної індукції. Якщо потік магнітного поля, який проходить через ділянку, що обмежена замкненим контуром, змінюється за часом, то в цьому контурі виникає ЕРС індукції

$$\varepsilon_i = -\frac{d\phi_B}{dt},$$

де $\Phi_e = BC \cos \alpha$ – потік магнітної індукції. У цьому випадку не має значення, що є причиною зміни магнітного потоку: змінюється чи магнітне поле, чи площа контуру, чи його орієнтація. Коли ж на місці цього контуру розмістити провідник, то в провіднику з'явиться електричний струм. ЕРС – це робота, яку здійснює електричне поле при переміщенні одиничного позитивного заряду по замкнутому контуру довжиною l . Оскільки робота – це добуток середньої сили, що діє на заряд вздовж контуру, на довжину контуру, а $F = E_\tau q_0$, де E_τ – дотична

складова напруженості електричного поля; q_0 – одиничний позитивний заряд, то можна записати, що $F = E_\tau$. Отже, якщо в законі Фарадея замінити величину ε_i добутком $E_\tau l$, то отримаємо друге рівняння Максвелла. Оскільки $\varepsilon_i = -\frac{d\phi_B}{dt}$, а $\varepsilon_i = \sum E_\tau l$, то

$$\sum E_\tau l = -\frac{d\phi_B}{dt}.$$

Третє рівняння Максвелла: повний магнітний потік через довільну замкнену поверхню дорівнює нулю, тобто $\phi_B = 0$.

Це рівняння відображає той факт, що в природі немає магнітних зарядів. Якщо провести силові лінії магнітного поля, то вони завжди будуть замкненими або прямуватимуть у нескінченність. Отже, скільки силових ліній входить всередину замкненої поверхні, стільки ж і виходить з неї.

Четверте рівняння Максвелла: добуток середнього значення вектора $\vec{B}$, який спрямований по дотичній, на довжину контуру дорівнює сумі електричного струму через поверхню, що обмежена контуром, і величини, пропорційній швидкості зміни електричного поля:

$$\sum B_\tau l = \mu_0 I + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\phi_e}{dt}.$$

Це рівняння показує, що магнітне поле може створюватись не тільки електричним струмом, але і змінним електричним полем. Із рівнянь Максвелла випливає, що джерелом електричного поля можуть бути або електричні заряди, або магнітне поле, яке змінюється за часом; магнітні поля можуть збуджуватись або рухомими зарядами (електричними струмами), або змінними електричними полями. Рівняння Максвелла не симетричні відносно електричного і магнітного полів. Це пов'язано з тим, що в природі існують електричні заряди, але не існують магнітні.

Рівняння Максвелла - найбільш загальні рівняння для електричного і магнітного полів для середовищ, які перебувають у стані спокою. Із рівнянь випливає, що змінне магнітне поле завжди пов'язане із змінним електричним полем, яке породжує його, і навпаки, тобто електричні і

магнітні поля нерозривно пов'язані одне з одним - вони утворюють єдине електромагнітне поле.

2.2. Електромагнітні хвилі

Не можна стверджувати, що в даній точці простору існує тільки електричне або магнітне поле, оскільки до електромагнітного поля застосовується принцип відносності Ейнштейна. Якщо електричне поле створюється системою нерухомих зарядів, то ці заряди, які є нерухомими відносно однієї інерційної системи відліку, рухаються відносно іншої і відповідно будуть породжувати не тільки електричне, а й вихрове магнітне поле. Аналогічно, нерухомий відносно однієї інерційної системи відліку провідник із постійним струмом, що збуджує в кожній точці простору постійне магнітне поле, рухається відносно інших інерційних систем, і змінне магнітне поле, що породжується, збуджує вихрове електричне поле.

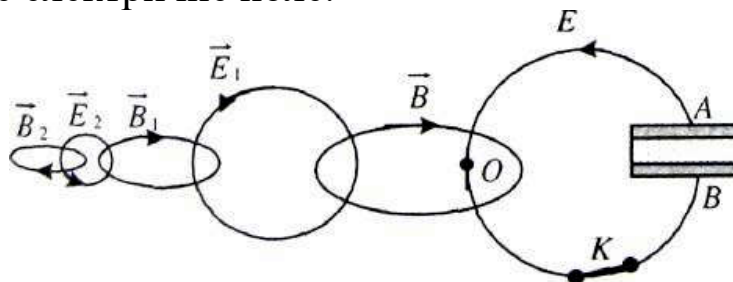


Рис. 7.

Розглянемо коливальний контур, в якому пластини конденсатора з'єднані провідником з індуктивністю L (рис.7). Коли ключ K замкнули, то на ділянці AOB виникає змінний електричний струм, зумовлений

коливальним рухом електронів. За час $t = \frac{1}{4}T$, де T - період електромагнітних коливань. У контурі, струм зростає від нуля до деякого максимального значення, а разом з ним зростає і вихрове магнітне поле. Напрямок ліній індукції $\vec{B}$ цього поля визначається за правилом правого свердлика.

В області простору (наприклад, лівіше точки O), що пронизується лініями магнітної індукції $\vec{B}$ змінного магнітного поля, виникає змінне електричне поле. При перезарядженні конденсатора в наступний час $t = T/4$ електрони будуть рухатись зі сповільненням, і в просторі біля провідника вихрове магнітне поле почне зменшуватись, зміниться на протилежний і напрямок вихрового електричного поля. При

безперервних коливаннях електронів у контурі в просторі буде поширюватись електромагнітна хвиля.

Електромагнітна хвиля - це змінне електромагнітне поле, яке поширюється в просторі.

Електромагнітні хвилі мають такі властивості:

- 1) вектори електричного поля $\vec{E}$ і магнітного $\vec{B}$ полів в електромагнітній хвилі завжди взаємно перпендикулярні: $\vec{E} \perp \vec{B}$, тобто електромагнітна хвиля є плоскою хвилею;
- 2) напрямок поширення електромагнітної хвилі визначається за правилом правого свердлика: хвиля поширюється в напрямку поступального руху гвинта, коли він повертається від $\vec{E}$ до $\vec{B}$. Іншими словами, напрямок поширення хвилі збігається з напрямком векторного добутку $\vec{E} * \vec{B}$;
- 3) електромагнітні хвилі є поперечними хвилями. Вектори $\vec{E}$ і $\vec{B}$ завжди перпендикулярні до напрямку поширення хвилі; на значних відстанях від джерела вектори не мають компонент, паралельних напрямку поширення;
- 4) у вакуумі швидкість поширення електромагнітних хвиль є усіх видів (світла, радіохвиль, рентгенівського випромінювання тощо) дорівнює $3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

За теорією Максвелла, швидкість поширення електромагнітних хвиль - величина скінченна, що визначається електричними і магнітними властивостями середовища, в якому поширюється:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon \mu}},$$

Де ε_0 і μ_0 - електрична і магнітна сталі; ε і μ - відносні електрична і магнітна проникності середовища. Якщо хвиля переходить з вакууму в середовище з діелектричною проникністю ε і магнітною μ , то довжина хвилі зменшується:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon \mu}},$$

Де $\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0}$ (λ_0 і ν_0 - довжина і частота хвилі у вакуумі);

- 5) електромагнітні хвилі переносять енергію і кількість руху (імпульс).

2.3. Енергія і імпульс електромагнітної хвилі

Коли електричні заряди рухаються з прискоренням, то виникає змінне в часі електромагнітне поле і від джерела поширюється електромагнітна хвиля.

Нехай заряджена частинка ($+q$) на шляху поширення електромагнітної хвилі (рис.8). Коли частинка спочатку перебуває в стані спокою, то електричне поле діє на частинку з деякою силою $\vec{F}$, і надає прискорення в напрямку вектора $\vec{E}$. Але як тільки частинка отримує швидкість у цьому напрямку,

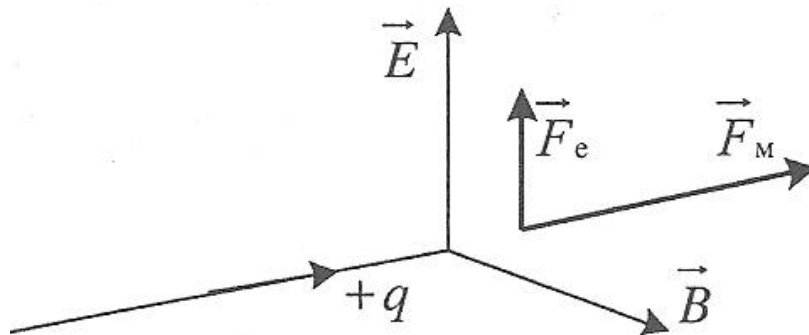


Рис. 8.

то на неї починає діяти з деякою силою і магнітне поле в напрямку поширення хвилі. В наступний час, який дорівнює половині періоду, напрямки векторів E і B зміняться на протилежний, і сила магнітного поля матиме той же напрямок (вздовж напрямку поширення хвилі). Оскільки сила, з якою діє на заряджену частинку електричне поле, перпендикулярна до напрямку поширення хвилі, то середнє значення її за період дорівнюватиме нулю.

Отже, середня сила, з якою електромагнітна хвиля діє на заряджену частинку, дорівнює силі магнітного поля. Якщо в початковий момент частинці, що перебувала в стані спокою, електромагнітна хвиля надає прискорення, то це означає, що хвиля передає зарядженій частинці як енергію, так і імпульс. Звідси можна зробити висновок, що електромагнітна хвиля переносить і енергію, і імпульс.

2.4. Світлові хвилі

У 1862 р. Максвелл припустив, що світло складається з поперечних рухів того самого середовища, яке служить причиною електричних і магнітних явищ. До цього часу на основі своїх рівнянь він розрахував

швидкість електромагнітних хвиль і знайшов, що ця швидкість була приблизно такою самою, як і визначена до цього швидкість світла. Отже, світло - це електромагнітна хвиля.

Експерименти, які підтвердили передбачення Максвелла, вперше були виконані Генріхом Герцем (1857-1894) в 1885-1889 рр., приблизно через 25 років після того, як Максвелл передбачив існування електромагнітних хвиль. Електромагнітні хвилі можуть відрізнятись одна від одної частотою коливань, але не всі вони створюють у людини відчуття світла. Згідно з електромагнітною теорією світла, до світлового випромінювання відносять тільки такі хвилі, частота коливань яких знаходиться в інтервалі від $4 \cdot 10^{14}$ до $7,5 \cdot 10^{14}$

Оскільки швидкість поширення світла у вакуумі дорівнює

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с, то довжину світла можна знайти за формулою $\lambda = \frac{c}{\nu}$. Видима

область електромагнітного випромінювання незначна і має дуже різкі межі, які визначаються властивостями органів зору людини. Високочастотна межа з ультрафіолетового боку спектра має довжину хвилі $4 \cdot 10^{-7}$, а низькочастотна межа з червоного боку - $7,6 \cdot 10^{-7}$. Отже, до світлового діапазону випромінювання належать такі електромагнітні хвилі, довжина яких у вакуумі лежить в інтервалі від 0,76 мкм до 0,4 мкм. Довжина хвилі видимого діапазону наведена нижче

$4 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-7}$	$\lambda, \text{ м}$
Ультра-фіолетовий	Фіолетовий, голубий	Зелений, жовтий	Оранжевий, червоний	Інфрачервоний

2.5. Поляризація світла

Згідно і теорією Максвелла світло є поперечною електромагнітною хвилею вектори електричного і магнітного подів хвилі взаємно перпендикулярні і здійснюють коливання перпендикулярно до вектора швидкості хвилі.

Світло являє собою сумарне електровипромінювання великої кількості атомів. Оскільки атоми випромінюють світлові хвилі незалежно один від одного, то світлова хвиля характеризується рівноправними неймовірними коливаннями світлового вектора - вектора напруженості електричного поля (це зумовлено тим, що при дії світла на речовину основне значення має електричне складова поля, що діє на електрони в атомах речовини).

Світло з найрізноманітнішими рівноправними орієнтаціями вектора напруженості електричного поля називається природним. Світло в якому напрямки коливань світлового вектора певним чином впорядковані, називають поляризованим.

Світло, в якого вектор E (і відповідно вектор B) здійснює коливання тільки в одному напрямку, називається плоскополяризованим.

Спрямуємо природне світло на пластинку турмаліну, яка вирізане з кристала. Повертаючи пластинку навколо напрямку поширення променя, жодних змін в інтенсивності світла не помітимо. Якщо на шляху світлових променів розмістити ще одну пластинку турмаліну і повертати її навколо напрямку поширення променя то інтенсивність променя, що пройшов через ці пластинки, змінюється залежно від кута між оптичними осями кристалів.

Пояснити це явище досить просто. Перша пластинка турмаліну пропускає коливання світлового променя тільки певного напрямку, тобто перетворює натуральне світло на плоско поляризоване. Друга ж пластинка турмаліну, залежно від її орієнтації, пропускає повну частину поляризованого світла. Пластинка, яка перетворює натуральне світло на поляризоване, називається поляризатором, а пластинка, яка служить для аналізу ступеня поляризації світла, - аналізатором.

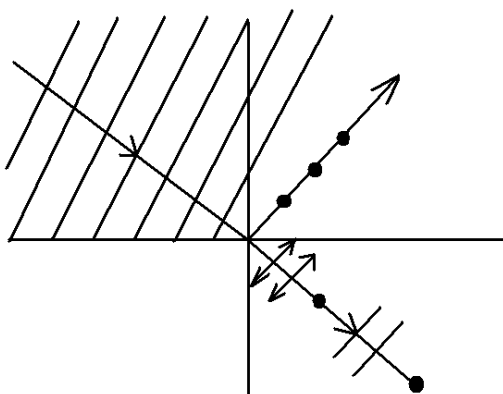


Рис. 9.

Якщо світло падає на межу поділу двох середовищ (наприклад, повітря і скло), то відбитий і заломлений промені будуть частково поляризовані (рис.9), причому у відбитому промені переважатимуть коливання, перпендикулярні до площини поширення світла, в заломленому - заливання, що паралельні площини падіння. Всі прозорі кристали (крім кристалів кубічної системи) мають властивість подвійного заломлення променів, тобто розкладання на два променя того променя, що падає на кристал.

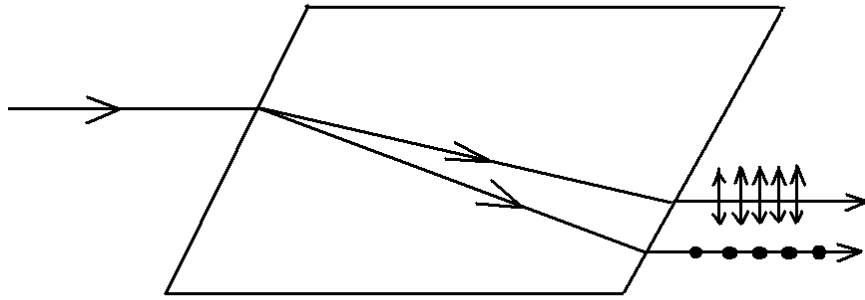


Рис.10

Якщо на кристал ісландського шпату (рис.10) направити пучок світла, то з кристала вийдуть два просторово розділених променя, які будуть паралельні один одному та променю який падає на поверхню кристала. Аналіз поляризації світла показує, що промені, які виходять із кристала, поляризовані у взаємно перпендикулярних площинах. Різні заломлення указує на те, що для поляризованих променів у різних площинах показники заломлення різні.

2.6. Основи квантової теорії

Спектри випромінювання нагрітого тіла

Проблеми розподілу енергії в спектрі теплового випромінювання абсолютно чорного тіла набула наприкінці XIX ст. не тільки теоретичного, а й практичного значення. До 1900 р. проблема мала вже вікову історію. Свічення нагрітих тіл було відоме дуже давно, але до початку XIX ст. відносять перші дослідження теплового або температурного випромінювання нагрітих тіл, які перебувають у стані термодинамічної рівноваги. Це випромінювання здійснюється за рахунок енергії хаотичного теплового руху частинок тіла і залежить від його температури. Тіло при нагріванні розжарюється і випромінює електромагнітні хвилі. Якщо температура досить висока, то частина випромінювання потрапляє у видиму частину спектра, завдяки чому можна спостерігати свічення розжареного тіла. На рисунку 17.9 показана форма спектрів випромінювання тіл, нагрітих до різних температур. Значення довжин хвиль $\lambda_{\max}$, яке відповідає максимумам на кривих розподілення, зменшується з підвищенням температури. Крім цього, зі збільшенням температури $T_2 > T_1$ інтенсивність випромінювання зростає і підпорядковується закону Стефана-Больцмана:

$$\varepsilon(T) = \sigma T^4$$

Де $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}(\text{м}^2 \text{К}^4)$ стала Стефана

Експериментальні дослідження спектрів випромінювання тіл при різних температурах показали, що значення максимуму довжин хвиль змінюється залежно від абсолютної температури T згідно із співвідношенням. $\lambda_{\max} = b/T$

Де $b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – стала Віна. Ця формула названа законом Віна (1864-1928), який її вперше запропонував. Отже, з підвищенням температури абсолютно чорного тіла максимум енергії випромінювання зміщується в бік коротких хвиль. Здійснювались спроби пояснити форму спектра теплового випромінювання в межах класичної електромагнітної теорії. Дві з таких спроб належить Віну і Д.П. Релею (1842-1919)

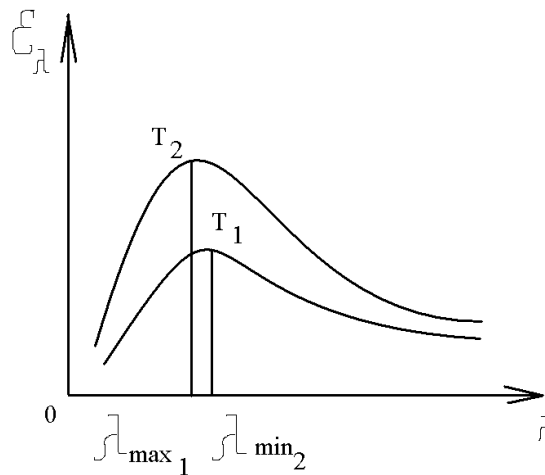


Рис. 11.

формула названа заход В.Віна (1864-1928), який її вперше запропонував. Отже, з підвищенням температури абсолютно чорного тіла максимум випромінювання зміщується в бік коротших хвиль.

Були спроби пояснити форму спектра теплового випромінювання в межах класичної електромагнітної теорії. Дві таких спроби належать Віну і Д.У.Релею (1842 - 1919). Але криві, які відповідали їхнім теоріям, не давали можливості задовільно описати експериментальні дані: крива Віна відрізняється від дослідних даних у довгохвильовому діапазоні, а крива Релея тільки в цьому діапазоні узгоджувалась з експериментом.

Отже, класична теорія не могла пояснити спектральний склад теплового випромінювання доти, доки Макс Планк (1858-1947) не зробив сміливого кроку вперед.

2.7. Квантова гіпотеза Планка

У 1900 р. М. Планк зробив спробу здійснити те, що не змогли зробити Він, Релей та інші вчені, - дати повне пояснення форми кривої розподілення інтенсивності в спектрі випромінювання для всіх довжин хвиль, а не тільки для довгохвильової і короткохвильової областей. Планк чисто теоретично отримав формулу, яка повністю відтворювала форму кривої спектрального випромінювання, але вона не мала будь-якого теоретичного випромінювання. Його ідея полягала в тому, що обмін енергією між випромінюванням і тілом не відбувається безперервно, а здійснюється окремими порціями, або квантами. Енергія одного кванта обчислюється за формулою

$$E = h\nu,$$

де $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - коефіцієнт пропорційності, який носить назву сталої Планка.

Формуючи свою теорію теплового випромінювання, Планк не мав будь-яких доказів існування квантів; єдиною причиною, яка спонукала його висловити таке припущення, була та, що концепція квантів дозволяла пояснити форму кривої розподілу енергії.

2.8. Фотоелектричний ефект

Ще в 1887 р. Генріх Герц (1857-1894), який експериментально довів існування електромагнітних хвиль і встановив їх властивості, виявив, що інтенсивність іскри, яка проскакувала між електродами з високою напругою, збільшувалась у тому випадку, коли електроди освітлювались ультрафіолетовим світлом.

Російський вчений О.Г. Столетов (1839-1896) повторив досліди Герца і в 1888р. вперше встановив, що висока напруга для таких дослідів несуттєва, оскільки інтенсивність іскри може збільшуватись і при незначній напрузі між електродами. При проведенні дослідів Столетов встановив, що пластинка із чистого цинку під дією ультрафіолетового випромінювання набуває позитивного електричного заряду, тобто з пластинки вибиваються електрони. Явище вибивання електронів світлом отримало назву **фотоелектричного ефекту**.

Якщо електрони, вибиті світлом, вилітають за межі речовини фотоефект називають **зовнішнім**, якщо відірвані від своїх атомів або молекул електрони залишаються всередині освітлювальної речовини, то фотоефект називають **внутрішнім**.

Для дослідження експерименту можна використати установку, яка зображена на рисунку (12). Дві пластинки А і В розміщені всередині трубки, з якої видаляли повітря. Пластинки з'єднані з джерелом напруги, яка регулюється, і амперметром.

При поступовому підвищенні напруги фотострум спочатку зростає, а потім стає постійним.

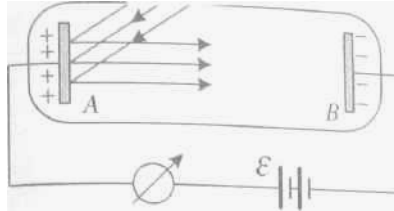


Рис.12.

Найбільший фотострум, який можна отримати при постійному світловому потоці, називається фотострумом насичення. Фотострум насичення отримується при таких напругах, коли всі електрони, які вибиваються світловим потоком, з електрода А долітають до електрода В.

Експериментально були встановлені три закони фотоефекту

- 1. Сила фотоструму насичення пропорційна світловому потоку, що падає на електрод.*
- 2. Максимальна кінетична енергія електронів, які вибиваються з речовини, не залежить від інтенсивності випромінювання, а залежить тільки від частоти випромінювання і матеріалу електрода.*
- 3. Червона межа фотоефекту визначається тільки матеріалом електрода і не залежить від Інтенсивності випромінювання.*

Якщо на електрод по черзі спрямовувати різне монохроматичне випромінювання, то можна помітити, що із збільшенням хвилі випромінювання кінетична енергія електронів, які вибиваються із речовини, зменшується і при досить великій довжині хвилі фотоефект не спостерігається.

Найбільша довжина хвилі, при якій ще можна спостерігати фотоефект, називається червоною межею фотоефекту для даного матеріалу.

У 1905 р. Альберт Ейнштейн (1879-1955) запропонував теорію, яка давала пояснення всіх фактів, пов'язаних з фотоефектом. Ейнштейн узагальнив гіпотезу Планка про квантовий характер процесу обміну енергією і висунув ідею, що будь-яке електромагнітне випромінювання

існує у формі дискретних згустків електромагнітної енергії, які називаються квантами, або фотонами. Він запропонував також, що при взаємодії з речовиною фотон поводить себе як частинка і передає свою енергію не речовині в цілому і навіть не атому, а окремому електрону. В основі теорії зовнішнього фотоефекту лежить припущення, що в металах електрони рухаються незалежно один від одного і фотон, що влучає в метал, взаємодіє з одним із них. Тому ця теорія називається одноелектронною.

Згідно з теорією Ейнштейна, кінетична енергія фотоелектрона дорівнює різниці між енергією фотона ультрафіолетового випромінювання і мінімальною енергією, яка необхідна для того, щоб вивільнити електрон із речовини (називається роботою виходу даної речовини), тобто

$$E_k = h\nu - A_s$$

Оскільки $E_k = \frac{m_2 V^2}{2}$ то рівняння можна записати у вигляді

$$h\nu = A_p + \frac{m_2 V^2}{2}$$

Це рівняння Ейнштейну для зовнішнього ефекту.

Якщо $h\nu < h\nu_0$ то явище фотоефекту спостерігатися не буде.

Червоної межі фотоефекту дорівнюватиме $\nu_0 = \frac{A_p}{h}$. Фотоефект спостерігається для частот, якщо виконується умова $\nu > \nu_0$, або для довжин хвиль $\lambda \leq \lambda_0$ тут ν_0 і λ_0 «частота і довжина хвилі випромінювання, які відповідають червоній межі фотоефекту. Найменша частота світла яка відповідає червоній межі фотоефекту залежить від роботи виходу, тобто від хімічної природи металу і стану його поверхні. Із фізичного змісту зовнішнього фотоефекту випливає, що загальне число n фотоелектронів, які вилітають за одиницю часу з поверхні металу, пропорційне числу фотонів, що падають за одиницю часу на поверхню металу.

2.9. Використання фотоефекту

Фотоелектричні явища широко використовуються в техніці. Прилади, в яких енергія світла керує енергією електричного струму або перетворюється в нього, називаються *фотоелементами*. Вакуумні

фотоелементи, в яких використовується явище зовнішнього фотоелефекту, являють собою скляний балон. Внутрішня поверхня цього балона покрита (майже наполовину) шаром світлочутливої речовини (робота виходу її мала), яка є "фотокатодом". Анодом є металева петля або сітка, що розміщена в центрі балона. При освітленні фотоелемента з його поверхні вилітають електрони, які при певній різниці потенціалів між анодом і катодом потрапляють на анод, а через фотоелемент протікає електричний струм. Якщо фотоелемент наповнити інертним газом, то струм можна підсилити. Для цього між електродами необхідно створити таку напругу, при якій виникає іонізація інертного газу.

Існують фотоелементи іншого типу, в яких використовується внутрішній фотоелефект, в основі якого лежить явище вивільнення світлом електронів, які знаходяться всередині діелектричного кристала або напівпровідника. Внаслідок перерозподілу електронів в об'ємі напівпровідникового матеріалу під дією потоку фотонів виникають вільні електричні заряди і електричний опір матеріалу різко зменшується. Такі фотоелементи з внутрішнім фотоелефектом називаються фотоопорами. Фотоопори можуть реагувати навіть на інфрачервоне довгохвильове випромінювання.

Сонячні батареї забезпечують енергією космічні літальні апарати. Вони складаються з великої кількості фотодіодів, які перетворюють світлову енергію на електричну. Фотодіод - кристал напівпровідника, одна частина якого має електронну провідність, а друга - діркову. Під дією випромінювання між цими частинами виникає *p-n*-перехід. При освітленні фотодіоду один його електрод заряджається позитивно, а другий - негативно. Якщо між ними ввімкнути опір, то через нього потече електричний струм.

2.10. Тиск світла. Ефект Комптона

Імпульс фотону виявляє себе особливо чітко в двох явищах: тиск світла і явище Комптона.

Існування тиску світла і його величина були обґрунтовані Максвеллом у 1873р. Він теоретично показав, що електромагнітні хвилі повинні створювати тиск на тіла, які попадають на шляху поширення хвиль. Світловий тиск згідно з розрахунками Максвелла, прямо пропорційні об'ємній густині енергії електромагнітного поля хвилі:

$$p = \omega(1 + k) \cos^2 \alpha$$

де k коефіцієнт вибивання, тобто відношення інтенсивності хвилі що відбивається тілом до інтенсивності хвилі, яка падає, α - кут падіння променів.

У 1900 році П.М Лебедев (1866-1912) експериментальним шляхом виміряв тиск, який створюють світлові електромагнітні хвилі на тверді тіла, а в 1909 виміряв тиск світла на газу. Результати Лебедева підтвердили електромагнітну теорію Максвелла.

Розглянемо, як з квантової точки зору можна отримати формулу Максвелла для світлового тиску, що створює потік монохроматичного світла, яке падає перпендикулярно до поверхні. Нехай на одиницю поверхні тіла падає n фотонів. Коефіцієнт відбивання світла дорівнює k , то kn фотонів відбивається, а $(1-k)n$ поглинається. Якщо імпульс фотона p_f то при відбиванні фотон передає поверхні імпульс, який дорівнює $2p_f$.

Кожен фотон, який поглинається, передає імпульс $p_f = \frac{h\nu}{c}$. Тиск світла на поверхню дорівнює силі імпульсу який передає поверхні на всі фотони.

$$p = \frac{2h\nu}{c} kn + \frac{h\nu}{c} (1-k)n$$

$$p = \frac{nh\nu}{c} (1+k)$$

Квантові властивості світла виявляються в ефекті, який в 1923 р. відкрив Комптон (1892-1962). Він спостерігав розсіювання монохроматичних рентгенівських променів "легкими" речовинами (графітом, парафіном тощо). Особливістю цих речовин є відносно слабкий зв'язок зовнішніх електронів в атомах з ядрами.

Вузький пучок рентгенівського випромінювання падав на речовину, а розсіяне під кутом θ випромінювання потрапляло на кристал, який відхиляв рентгенівські промені з різною довжиною на різні кути. На фотоплівці рентгенівське випромінювання з довжиною хвилі λ дає чітку лінію. Якщо механізм дії рентгенівського випромінювання розглядати як хвильовий процес, то атомні електрони яка відхиляються під дією електромагнітного поля, почнуть. Коливатися з частотою рентгенівського випромінювання що падає. У цьому випадку нова лінія на фотопластинці не виявиться з'являється і нова лінія що відповідає довжині хвилі фотопластинці поряд з лінією, яка виповідала довжині хвилі λ .

Довжини хвиль розрізнялись на величину

$$\Delta\lambda = \lambda^1 - \lambda = 2\pi\lambda_0 \sin^2 \frac{\theta}{2},$$

де $\lambda_0 = \frac{h}{m_0 c} = 2,426 \cdot 10^{-12} \text{ м}$ - комптонівська довжина хвилі; m_0 — маса електрона. Комптон висловлював сміливу ідею, що рентгенівські промені являють собою потік фотонів, які мають певний імпульс, як і довільні тверді частинки, і що акт розсіювання — це пружне зіткнення між фотоном і електроном.

Зміщення довжини хвилі рентгенівського випромінювання, яке зумовлене пружним розсіюванням фотонів електронами називається ефектом Комптона.

Особливе значення ефекту Комптона полягає в тому, що в ньому безпосередньо проявляється імпульс фотона і тим самим однозначно доводиться його існування.

2.11. Основи фотометрії

Розділ оптики, в якому вивчається світловий потік і всі явища, пов'язані з ним, називається *фотометрією*. *Світловий потік — це та частина світлової енергії, яка здійснює зорове відчуття. Світловий потік дорівнює енергії, яку випромінює джерело світла, що поширюється в якій-небудь частині простору за одиницю часу:*

$$\Phi = \frac{W}{t},$$

де Φ — світловий потік; W — світлова енергія; t — час, протягом якого падає світло.

Кількість енергії, яку випромінює яке-небудь точкове джерело світла за одиницю часу в усіх напрямках, визначає *повний світловий потік*.

Важливою енергетичною характеристикою джерела є світла є *сила світла*. *Сила світла - фізична величина, що чисельно дорівнює світловому потоку, який поширюється від точкового джерела світла в одиничному тілесному куті:*

$$I = \frac{\Phi}{\omega},$$

де ω — тілесний кут.

Тілесний кут вимірюють відношенням площі кульової поверхні σ до квадрата радіуса r даної кульової поверхні:

$$\omega = \frac{\sigma}{r^2}.$$

Якщо $\sigma = r^2$, то тілесний кут дорівнює одиниці. Цю одиницю тілесного кута називають *стерадіаном*. Оскільки площа всієї кульової поверхні дорівнює $4\pi r^2$, то тілесний кут навколо джерела світла, розміщеного в центрі сфери, дорівнює 4π ; стерадіана (ср).

За основну оптичну одиницю сили світла в СІ взято *канделу* (кд). До 1970 р. в СРСР для цієї одиниці застосовували назву «свічка». У 1967 р. на XIII Генеральній конференції з мір і ваги було прийнято таке означення кандели.

Кандела — сила світла, яке випускається з площі $\frac{1}{600000} \text{ м}^2$ перерізу повного випромінювача в перпендикулярному до цього перерізу напрямі при температурі тверднення платини і тиску 101 325 Па. Означена так одиниця сили світла майже не відрізняється за величиною від свічки, означення якої було прийнято IX Генеральною конференцією з мір і ваги в 1948 р.

Свічкою називають $\frac{1}{60}$ частину сили світла, яке випускає один квадратний сантиметр повного випромінювача при температурі тверднення платини в напрямі нормалі до поверхні, яка випромінює.

Одиницю світлового потоку в СІ можна визначити з співвідношення $\Phi = I\omega$. За одиницю світлового потоку беруть *люмен* (лм). 1 люмен є світловий потік, який рівномірно поширюється в тілесному куті в 1 стерадіан при силі світла в 1 канделу

$$1 \text{ лм} = 1 \text{ кд} \cdot 1 \text{ ср}.$$

Освітленість є фізична величина, яка дорівнює рівномірно розподіленому світловому потоку, що припадає на одиницю площі освітлюваної поверхні:

$$E = \frac{\phi}{S}.$$

Одиницю вимірювання освітленості в СІ називають *люксом* (лк). Люкс визначають з співвідношення:

$$1 \text{ лк} = 1 \text{ лм/м}^2.$$

У системі СГС освітленість вимірюють у *фотах*

$$1 \text{ фот} = 1 \text{ лм/см}^2.$$

Світність джерела світла — це фізична величина, яка чисельно дорівнює світловому потоку, що випромінюється з одиниці площі поверхні випромінювача в усіх напрямках

$$R = \frac{\phi}{S},$$

де S — площа випромінюючої поверхні джерела світла. Світність вимірюють тими самими одиницями, що й освітленість.

Для характеристики різної видимості окремих ділянок світної поверхні вводять поняття *яскравості*. *Яскравість — фізична величина, що вимірюється силою світла, яка випромінюється з одиниці площі поверхні випромінювача в перпендикулярному до цієї поверхні напрямі*

$$B = \frac{I}{S}.$$

Одиницею яскравості в СІ є *ніт*. 1 ніт - яскравість такого джерела світла, яке випромінює з 1 м^2 світної поверхні світло силою в 1 кд

$$1 \text{ ніт} = 1 \frac{\text{кд}}{\text{м}^2}.$$

2.12. Закони освітленості. Фотометр

Світло, яке виходить з точкового джерела, по-різному освітлює предмети, розміщені на різних відстанях від джерела світла.

Нехай маємо джерело світла силою I , яке випромінює повний світловий потік Φ_0 . Опишемо сферичну поверхню S_0 радіусом R навколо цього джерела, тоді освітленість поверхні

$$E_0 = \frac{\phi_0}{S_0},$$

але оскільки $\phi_0 = I\omega = 4\pi I$ при $\omega = 4\pi$ і враховуючи, що площа поверхні сфери $S_0 = 4\pi R^2$, дістанемо

$$E_0 = \frac{4\pi I}{4\pi R^2} = \frac{I}{R^2}.$$

Це і є перший закон освітленості, який можна прочитати так:
освітленість поверхні, перпендикулярної до світлового потоку, прямо пропорційна силі світла точкового джерела і обернено пропорційна

квадрату відстані освітлюваної поверхні до джерела.

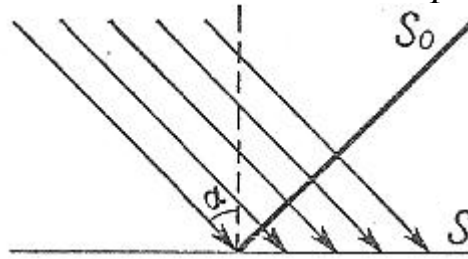


Рис.13.

Якщо поверхня не перпендикулярна до світлового потоку, то її освітленість залежить також від кута падіння світлового променя. *Кутом падіння* називають кут між напрямом падаючого променя і перпендикуляром до межі поділу середовищ у точці падіння.

Нехай промені світла падають на поверхню під кутом α . Знайдемо освітленість E поверхні S (рис. 13).

Освітленість E_0 поверхні S_0 , перпендикулярної до світлового потоку Φ , дорівнює $E_0 = \frac{\Phi}{S_0}$. Освітленість поверхні S дорівнює

$$E = \frac{\Phi}{S}.$$

Але, як видно з рисунка, $S_0 = S \cos \alpha$, або $S = \frac{S_0}{\cos \alpha}$. Тоді

$$E = \frac{\Phi \cos \alpha}{S_0}, \text{ або } E = E_0 \cos \alpha.$$

Це і є другий закон освітленості: *освітленість поверхні прямо пропорційна косинусу кута падіння.*

Об'єднуючи перший і другий закон, дістанемо узагальнений закон освітленості:

$$E = \frac{1}{R^2} \cos \alpha.$$

Освітленість поверхні, яку створює точкове джерело світла, прямо пропорційна силі світла джерела, косинусу кута падіння і обернено пропорційна квадрату відстані від поверхні до джерела.

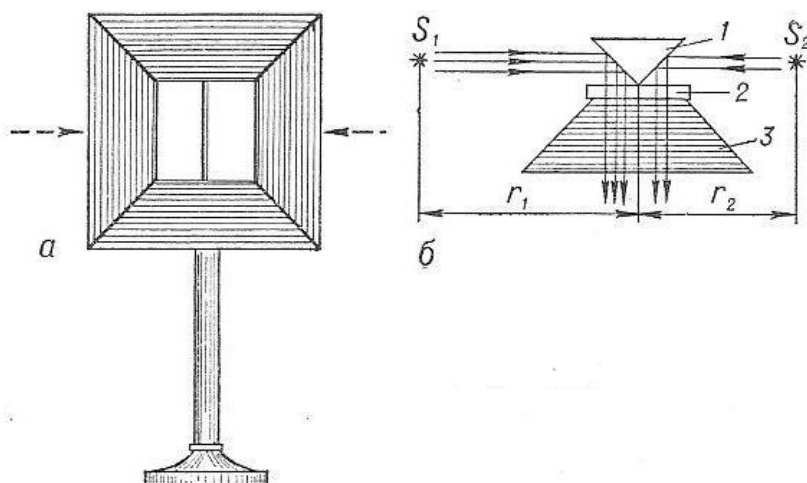


Рис.14.

Дуже часто доводиться порівнювати силу світла різних джерел. Для цього використовують прилади, які називаються *фотомерами*. Є різні типи фотометрів. Дія найпростіших фотометрів ґрунтується на здатності нашого ока фіксувати однаковість освітленості двох сусідніх поверхонь. Будову одного з найпростіших фотометрів зображено на рис. 14 (*а* – вигляд спереду, *б* – вигляд зверху). Фотомер складається з тригранної призми (1), забарвленої в білий колір, матового скла (2) і темного екрана (3). Призму фотомера з обох боків освітлюють джерелами світла S_1 і S_2 , сила світла яких відповідно дорівнює I_1 і I_2 . Світло, падаючи на грані призми і відбиваючись від них, освітлює праву і ліву половини матового скла. Переміщуючи джерела світла відносно фотомера, можна добитися однакової освітленості обох половин матового скла:

$$E_1 = E_2, \quad E_1 = \frac{I_1}{r_1^2}, \quad E_2 = \frac{I_2}{r_2^2},$$

де r_1 і r_2 - відстані від джерела світла до матового скла фотомера:

$$\frac{I_1}{r_1^2} = \frac{I_2}{r_2^2}, \quad \text{або} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}.$$

Знаючи силу світла одного джерела, наприклад I_1 , можна визначити силу світла невідомого джерела:

$$I_2 = \frac{I_1 r_2^2}{r_1^2}.$$

Приклади розв'язування задач

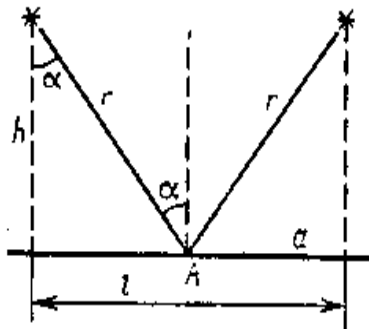


Рис.15.

Задача 1. На якій відстані один від одного необхідно підвісити лампи в теплицях, щоб освітленість E на поверхні Землі в точці, що лежить посередині між двома лампами, була не менше 200 лк? Висота теплиці $h = 2$ м. Сила світла кожної лампи $I = 800$ кд (рис. 15).

Розв'язування. Відстань l між лампами можна визначити з формули прямокутного трикутника:

$$l = 2a = 2\sqrt{r^2 - h^2} \quad (1)$$

Лампу можна прийняти за точкове джерело світла, оскільки її розміри малі в порівнянні з відстанню до точки, в якій визначається освітленість. Тому знайти відстань r від лампи до точки А можна з формули освітленості:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha, \quad (2)$$

де α — кут, під яким падають промені. Підставивши в (2) $\cos \alpha = h/r$, виразимо r :

$$r = \sqrt[3]{Ih/E} \quad (3)$$

Підставимо вираз (3) в (1):

$$l = 2\sqrt{\left(\sqrt[3]{Ih/E}\right)^2 - h^2}. \quad (4)$$

Підставимо числові значення величин в (4) і обчислимо

$$l = 2\sqrt{\left(\sqrt[3]{800 \cdot 2/100}\right)^2 - 2^2} \text{ м} = 2\sqrt{\left(\sqrt[3]{16}\right)^2 - 4} \text{ м} = 2,32 \text{ м}.$$

Задача 2. Фокусна відстань об'єктиву мікроскопа $f_1 = 5$ мм, окуляра $f_2 = 25$ мм. Предмет знаходиться на відстані $s = 5,1$ мм від об'єктиву (рис.16). Обчислити довжину тубуса мікроскопа і збільшення, що дається мікроскопом β .

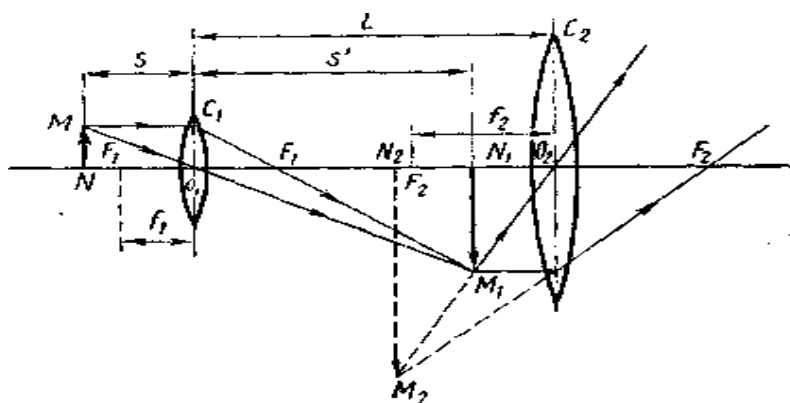


Рис.16.

Розв'язування. Збільшення мікроскопа

$$\beta = \beta_1 \beta_2, \quad (1)$$

де β_1 — збільшення об'єктиву; β_2 — збільшення окуляра, визначувані по формулах

$$\beta_1 = s' / f_1; \quad (2)$$

$$\beta_2 = 0,25 / f_2 \quad (3)$$

де s' — відстань від об'єктиву до дійсного зображення, що дається їм; 0,25 м — відстань якнайкращого бачення для нормального ока.

З обліком (2) і (3) формула (1) прийме вигляд

$$\beta = \frac{0,25s'}{f_1 f_2} \quad (4)$$

Відстань s' від об'єктиву до зображення можна знайти з формули лінзи:

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$$

(s — відстань від предмету до лінзи), звідки $s' = \frac{f_1 s}{s - f_1}$

Підставивши вираз для s' у (4), одержимо

$$\beta = \frac{0,25s}{f_2(s - f_1)} \quad (5)$$

Випишемо величини, що входять у формулу (5), в СІ: $s = 5,1 \cdot 10^{-3}$ м
 $f_1 = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $f_2 = 25 \cdot 10^{-3}$ м.

Довжину тубуса визначимо, виходячи з таких міркувань, Дійсне зображення, що дається об'єктивом, повинне лежати у фокусі окуляра, оскільки окуляр діє як лупа (мал. 10). Тому довжина тубуса

$$L = s' + f_2 = \frac{f_1 s}{s - f_2} + f_2 \quad (6)$$

Підставимо числові значення величин в (5) і (6) і обчислимо:

$$\beta = \frac{0,25 \cdot 5,1 \cdot 10^{-3}}{25 \cdot 10^{-3} (5,1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3})} = 510$$

$$L = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 5,1 \cdot 10^{-3}}{5,1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}} \text{ м} + 25 \cdot 10^{-3} = 0,28 \text{ м}$$

Задача 3. *Визначити число штрихів на 1 мм дифракційних ґрат, якщо при нормальному падінні світла довжиною хвилі $\lambda = 600$ нм ґрати дають перший максимум на відстані $l = 3,3$ см від центрального. Відстань від ґрат до екрану $L = 110$ см.*

Розв'язування. Число штрихів N на 1 мм ґрат визначимо по формулі

$$N = 1/d \quad (1)$$

де d — період ґрат (мал. 11).

Період ґрат знайдемо з умови максимуму:

$$d \sin \varphi = k \lambda \quad (2)$$

де φ — кут, під яким спостерігається k -й максимум; k — порядок (номер) максимуму.

Зважаючи на те що для максимуму 1-го порядку кут малий, можна прийняти

$$\sin \varphi = \operatorname{tg} \varphi = l / L \quad (3)$$

Підставивши у формулу (2) вираз синуса кута з (3), визначимо постійну ґрати:

$$d = k \lambda L / l \quad (4)$$

З обліком (4) формула (1) прийме вигляд

$$N = l / (k \lambda L) \quad (5)$$

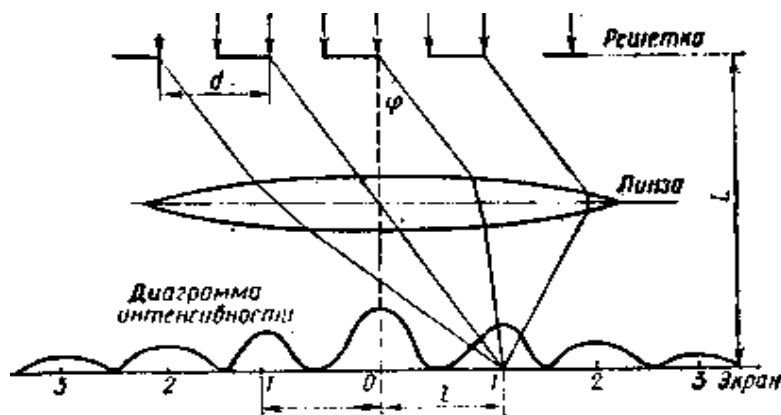


Рис.17.

Випишемо числові значення величин, що входять в (5), в СІ: $l = 3,3\text{ м}$
 $L = 1,10\text{ м}$ $k = 1$, $\lambda = 6 \cdot 10^{-7}\text{ м}$.

Підставимо числові значення величин в (5) і обчислимо.

Задача 4. Частота потужних імпульсів випромінювання радіолокатора аеропорту $f = 500\text{ Гц}$. Який радіус його дії? Як довго ціль, що рухається зі швидкістю 900 км/год , летітиме від краю зони спостереження до точки розташування радіолокатора?

Розв'язання. Між двома імпульсами проходить час $T = 1/f = 0,002\text{ с}$. За цей час імпульс має дійти до цілі, відбитись і повернутись до приймача локатора. Отже, радіус дії $R = cT/2 = 300\text{ км}$. Таку відстань ціль пройде за час $t = R/v = 20\text{ хв}$.

Відповідь: радіус дії локатора 300 км ; таку відстань пасажирський літак проходить за 20 хв .

Задача 5. Людина може повернути у руці плоске дзеркало на кут 90° за час $0,1 — 0,2\text{ с}$. Це викликає рух на віддаленому екрані «зайчика», утвореного відбитими дзеркалом променями Сонця. Якою має бути відстань до екрана з поверхні Землі, щоб швидкість «зайчика» в два рази перевищила швидкість світла у вакуумі?

Розв'язання: На рис.18. пунктиром показано початкове положення дзеркала, суцільною лінією — його положення після повороту на кут φ . Легко бачити, що перпендикуляр до дзеркала робить поворот на φ , а напрям відбитого променя — на кут 2φ . Отже, кутова швидкість руху «зайчика» вдвічі перевищує кутову швидкість поворота дзеркала. З формули $v = R\omega$ знаходимо відстань до екрану:

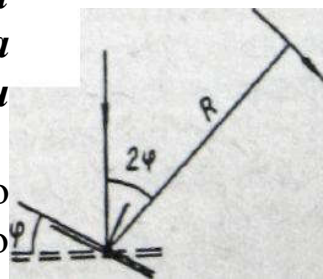


Рис.18.

$$2c = R \frac{2\varphi}{t} \rightarrow R = \frac{ct}{\pi/2} = (1,9 - 3,8) \cdot 10^4 \text{ км}$$

Відповідь: якщо екран знаходиться на відстані 19 000 – 38 000 км і далі, то швидкість «зайчика» від дзеркала дорівнює перевищить швидкість світла у вакуумі.

Задача 6. У кімнаті площею $4 \times 5 \text{ м}^2$ дві суміжні стіни являють собою плоскі дзеркала. Яку площу кімнати бачить людина, яка стоїть на відстані 2м від одного і 3м — від другого дзеркала? Яка відстань від людини до найбільш віддаленого до неї зображення?

Розв'язання. Будуючи зображення, переконуємось, що їх три і вони разом з предметом утворюють прямокутник зі сторонами 4м і 6м. Отже відстань від людини до найвіддаленішого її зображення

$$l = \sqrt{(2c)^2 + (2d)^2} = 2\sqrt{c^2 + d^2} = 2\sqrt{13} \text{ м} = 7,2 \text{ м}$$

Очевидно, що людині кімната здається вчетверо більшою і має площу 80 м^2 .

Задача 7. У певний момент ранку на екваторі Землі довжина тіні стовпа дорівнювала l_1 , а через інтервал часу t вона стала l_2 . Обчисліть висоту стовпа.

Розв'язання. Позначимо через φ_1 кут падіння сонячних променів у початковий момент, $\varphi_2 = \varphi_1 + \alpha$ — кут падіння через час t . Враховуючи рівномірність руху Сонця по небу, можна обчислити кут повороту Сонця $\alpha = 2\pi / T_0$, де T_0 — доба.

Запишемо довжини тіні через вказані кути і висоту стовпа $h = l_1 = h \cdot \operatorname{tg} \varphi_1$; $l_2 = \operatorname{tg}(\varphi_1 + \alpha) h$ або $l_2 = h(\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \alpha)(1 - \operatorname{tg} \varphi_1 \operatorname{tg} \alpha)^{-1}$. З першого рівняння знаходимо $\operatorname{tg} \varphi_1 = l_1 / h$, підставляємо у друге і дістаємо квадратне рівняння для обчислення висоти стовпа $h^2 - h(l_1 - l_2)(\operatorname{tg} \alpha)^{-1} + l_1 l_2 = 0$, розв'язок якого має вигляд $h = 0,5(l_1 - l_2) \cdot \operatorname{tg}^{-1} \alpha \pm [0,25(l_1 - l_2) \operatorname{tg}^{-2} \alpha - l_1 l_2]^{1/2}$.

Радимо пам'ятати, що у випадку, коли два дзеркала утворюють двогранний кут $\varphi = 2\pi / n$, де n — ціле число, то повне число зображень предмета на бісектрисі цього кута дорівнює $(n - 1)$. Разом з предметом $(n - 1)$ зображень лежать у вершинах правильного n -кутника, вписаного у коло радіусом R , де R — відстань від предмета до вершини сходження дзеркал.

Розглянемо приклади задач на визначення променя у пластинках і задач на заломлення променів у призмі, які вимагають певних знань з геометрії. При розв'язуванні їх вступники дуже часто роблять помилки.

Задача 8. Пучок паралельних променів світла шириною 5 см падає під кутом $\alpha = 60^\circ$ на поверхню скла (показник заломлення $n = 5/3$) товщиною 10 см. Знайти зміщення пучка від початкового напрямку і його ширину в склі.

Розв'язання. Хід пучка променів показано на рисі 58, де a , - ширина пучка в склі, h його зміщення після виходу із скляної пластинки. Запишемо закон заломлення світла: $\sin \alpha = n \sin \beta$. Кути γ і α однакові тому виконується рівність $h = CD \cos \gamma = CD \cos \alpha$. Оскільки відстані то $CD = d \operatorname{tg} \alpha - d \operatorname{tg} \beta$. Підставимо одержаний вираз для CD у формулу $h = CD \cos \alpha$ і виконаємо алгебраїчні перетворення:

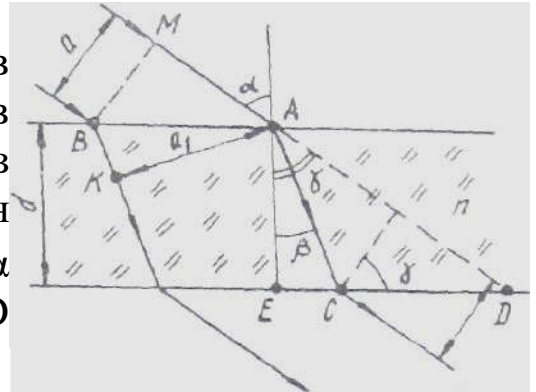


Рис.19.

$$h = d \sin \alpha \left(1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right) = 6,74 \text{ см}$$

Для знаходження ширини пучка у склі розглянемо трикутники АКВ і АВМ зі спільною гіпотенузою і гострими кутами α і β . Тоді $AB = a / \cos \alpha = a_1 / \cos \beta$. Звідси й знаходимо формулу для ширини пучка у склі

$$a_1 = a \cos \beta / \cos \alpha = a \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} / n \cos \alpha = 8,5 \text{ см.}$$

Відповідь: зміщення пучка 6,74 см, ширина його у склі — 8,5 см.

Задача 9. На дні посудини, яка заповнена водою, лежить плоске дзеркало. Людина, яка нахилилась над посудиною, бачить зображення свого ока в дзеркалі на відстані $d = 25$ см. Відстань від поверхні ока до поверхні води $h = 5$ см., показник заломлення води $n = 4/3$. Знайти глибину H посудини.

Розв'язання. Зробимо чіткий схематичний рисунок (20).

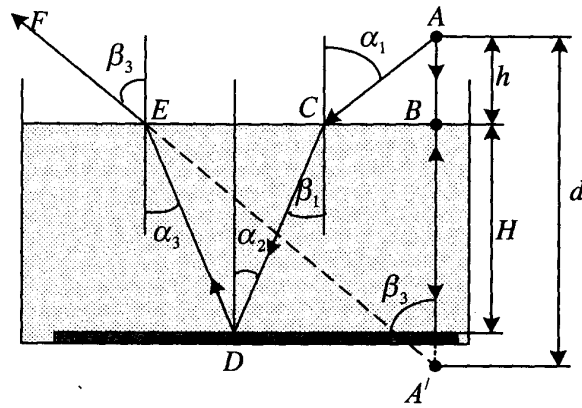


Рис.20

Нехай точка А - деяка точка ока людини. Для побудови зображення точки необхідно використати, як мінімум, два промені. Один промінь спрямуємо перпендикулярно до межі поділу різних середовищ — на рисунку це промінь АВ. Цей промінь проходить межу поділу не заломлюючись і відбивається від дзеркала без зміни кута нахилу.

Другим променем нехай буде довільний промінь АС. На межі поділу повітря - вода (в точці С) промінь заломлюється, доходить до дзеркала, в точці D відбивається від нього, іще раз заломлюється на межі поділу середовищ (в точці Е) і виходить у повітря в напрямку EF.

Зображення A' буде знаходитись на перетині продовжень променів АВ і EF.

Оскільки $\operatorname{tg} a_1 = \frac{BC}{h}$, то $BC = h \operatorname{tg} a_1$.

Розміри зіниці ока набагато менші за відстані d , h , і H , тому кути, які будуть нас цікавити, дуже малі, отже, їх тангенс можна замінити синусами або й самими кутами

$$BC = h \operatorname{tg} a_1 = h \sin a_1.$$

Оскільки $\operatorname{tg} a_2 = \frac{CE}{2H}$, то $CE = 2H \operatorname{tg} a_2 = 2H \operatorname{tg} \beta_1 \Rightarrow CE = 2H \sin \beta_1$. (1)

Враховуючи те, що $n = \frac{\sin a_1}{\sin \beta_1} \Rightarrow \sin \beta_1 = \frac{\sin a_1}{n}$, отримуємо $CE = 2H \sin a_1$ (2)

З рисунка видно, що $d = h + BA'$.

Оскільки $\operatorname{tg} \beta_3 = \frac{BE}{BA'}$, то $BA' = \frac{BE}{\operatorname{tg} \beta_3}$, і кути a_1 і β_3 рівні між собою,

то $BA' = \frac{BE}{\operatorname{tg} a_1} = \frac{BE}{\sin a_1}$. Таким чином, $d = h + \frac{BE}{\sin a_1}$. (3)

Відрізок BE складається з двох відрізків - BC і CE , тобто

$$BE = h \sin a_1 + \frac{2H}{n} \sin a_1 = \left(h + \frac{2H}{n} \right) \sin a_1.$$

Підставивши вираз для BE в рівняння (3), отримаємо

$$d = h + h + \frac{2H}{n} = 2h + \frac{2H}{n} \Rightarrow dn = 2nh + 2H \Rightarrow H = n\left(\frac{d}{2} - h\right); H = 10 \text{ см.}$$

Необхідно відзначити, що в цій задачі око є як джерело світлового випромінювання, так і його приймач.

Задача 10. Яка може бути найменша відстань L між предметом і його зображенням у збірній лінзі з фокусною відстанню F ?

Розв'язок: Може бути два випадки:

- 1) необхідно знайти відстань між предметом і дійсним зображенням (предмет і зображення знаходяться по різні боки від лінзи, рис.21);
- 2) необхідно знайти відстань між предметом і уявним зображенням (предмет і зображення знаходяться по один бік від лінзи, рис.21).

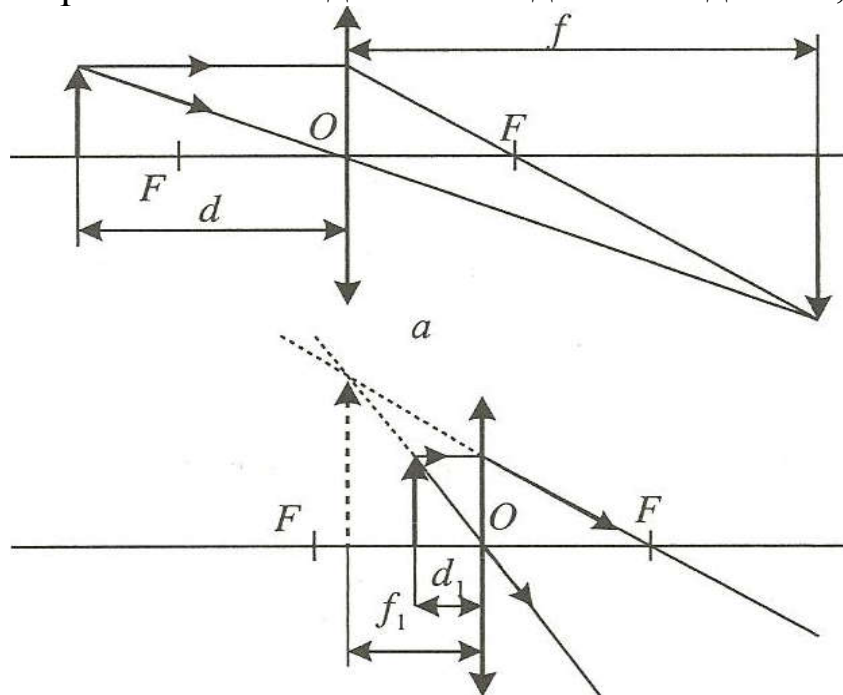


Рис.21

Нехай величини d і f (відстань від предмета до лінзи і від лінзи до зображення), які входять у формулу лінзи, є координатами предмета і зображення на числовій осі, яка збігається з оптичною віссю лінзи. При цьому за початок відліку оберемо оптичний центр лінзи, а додатний напрямок відліку нехай збігається з напрямком поширення світла. Тому відстань між предметом і зображенням, що буде відраховуватись вздовж цієї осі, є велечина додатна.

Розглянемо перший випадок, коли предмет знаходиться на відстані $d > F$ від лінзи.

Запишемо формулу тонкої лінзи:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}. \quad (1)$$

Оскільки, згідно з умовою задачі, $L = f + d \Rightarrow d = L - f$, то, підставивши вираз для визначення d в рівняння (16.15) і рзв'язавши його відносно L отримаємо

$$L = \pm \frac{f^2}{f - F}. \quad (2)$$

Тут L – функції двох змінних d і f .

Тепер можна застосувати звичайний метод дослідження функції на екстремум. Необхідно взяти першу похідну від L по змінній f і прирівняти її до нуля:

$$\begin{aligned} \frac{dL}{df} = \pm \left(\frac{f^2}{f - F} \right)' &= \pm \frac{2f(f - F) - f^2}{(f - F)^2} = \pm \frac{f(f - 2F)}{(f - F)^2}, \\ \frac{f(f - 2F)}{(f - F)^2} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Рівняння (3) має два корені: $f=0$ і $f=2F$.

Для першого випадку, коли зображення дійсне, має виконуватись нерівність $f > F$, тому перший корінь не підходить. Отже, $f=2F$.

Підставивши вираз для f у формулу (2), знайдемо мінімальну відстань L :

$$L_{\min} = \frac{4F^2}{2F - F} = 4F.$$

Якщо ж зображення уявне (другий випадок), то $f \leq 0$; тоді використаємо перший корінь, коли $f = 0$. Отже, $L_{\min} = 0$.

Це відповідає випадку, коли предмет знаходиться біля лінзи і зображення збігається з ним.

Для того щоб впевнитись, що значення f відповідає мініимальному, а не максимальному значенню L , візьмемо другу похідну і визначимо її знак:

$$\frac{d^2L}{df^2} = L'' = \pm \frac{2F^2}{(f - F)^3}.$$

Знаки «+» і «-», які стоять перед дробом, відповідають нерівностям $f > F$ і $f < F$, тому в будь-якому випадку $L'' > 0$ і відповідно виконується умова мінімуму функції $L = L(f)$.

Задача 11. Відстань від предмета до екрана $L_1 = 100 \text{ см}$. Лінза, яка розміщена між ними, дає чітке зображення предмета на

екрані у двох положеннях, відстань між якими $L = 20 \text{ см}$. Знайти фокусну відстань лінзи.

Розв'язок: Побудуємо чіткий рисунок ходу променів, який відповідатиме умові задачі (рисунок 22).

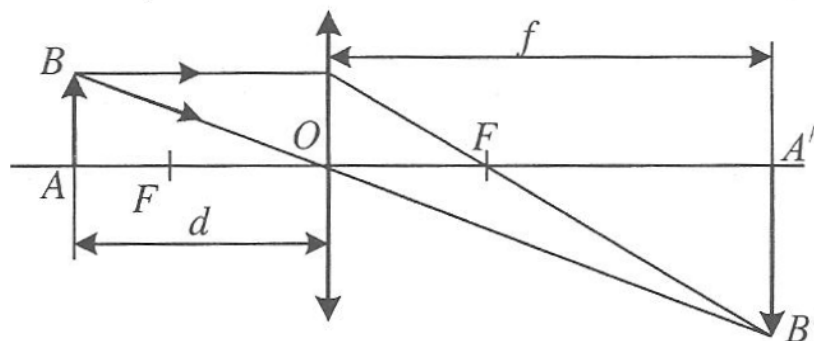


Рис. 22

Оскільки зображення на екрані, то воно є дійсним, і відповідно лінза є збіркою (рис.22). AB – висота предмета, $A'B'$ – висота зображення, $AO = d$ – відстань від предмета до оптичного центра лінзи, $OA' = f$ – відстань від оптичного центра лінзи до зображення.

За умовою задачі $f + d = L_1 \Rightarrow f = L_1 - d$.

Запишемо формулу тонкої лінзи і знайдемо відстань від лінзи до зображення f : $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} \Rightarrow f = \frac{Fd}{d - F}$.

Побудуємо графіки функцій $f(d) = L_1 - d$ і $f(d) = \frac{Fd}{d - F}$.

Для побудови графіка функції $f(d) = \frac{Fd}{d - F}$ перепишемо праву частину виразу у вигляді

$$\frac{Fd}{d - F} = F \frac{d - F + F}{d - F} = F \left(1 + \frac{F}{d - F} \right).$$

Зрозуміло, що для побудови графіка $f(d) = F \left(1 + \frac{F}{d - F} \right)$ спочатку необхідно побудувати графік $1/d$, зсунути його на відстань F вправо по осі абсцис, помножити на F , зсунути на 1 по осі ординат і помножити на F .

Графіки залежностей $f(d)$ наведені на рисунку (23).

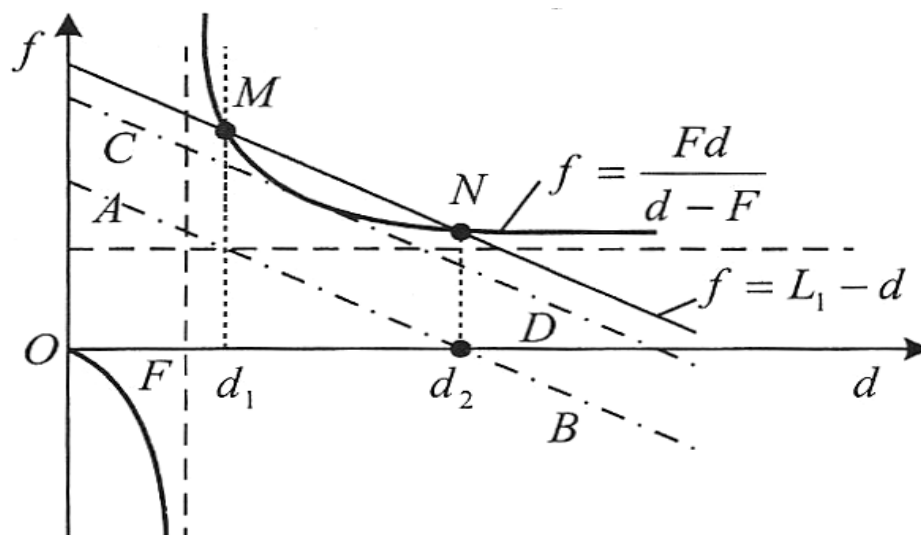


Рис.23

Пряма $f(d) = L_1 - d$ може не мати жодної спільної точки з гіперболою (пряма AB), одну спільну точку (пряма CD), дві спільні точки, які відповідають двом різним відстаням від предмета до лінзи (пряма MN).

Ці точки можна знайти, якщо розв'язати рівняння $f(d) = L_1 - d$ і $f(d) = \frac{Fd}{d-F}$. Прирівнявши праві частини цих рівнянь, дістанемо $L_1 - d = \frac{Fd}{d-F}$ або $d^2 - L_1d + L_1F = 0$. Розв'язавши квадратне рівняння відносно d , отримаємо

$$d_{1,2} = \frac{L_1 \pm \sqrt{L_1^2(1 - 4F/L_1)}}{2} = \frac{L_1}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4F}{L_1}} \right).$$

З цього можна зробити висновок, що обидва корені додатні.

За умовою задачі $d_2 - d_1 = L$, тоді

$$\frac{L_1}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4F}{L_1}} \right) - \frac{L_1}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4F}{L_1}} \right) = L \Rightarrow \frac{4F}{L_1} = 1 - \frac{L^2}{L_1} \Rightarrow F = \frac{L_1^2 - L^2}{4L_1} = 24 \text{ см.}$$

Розглянемо випадок, коли відстань між предметом і екраном залишається постійною, а переміщують тільки лінзу, тобто $f + d = \text{const.}$

Розробимо два чітких рисунки (рис.24), які відповідають двом положенням лінзи, розмістивши їх один під одним.

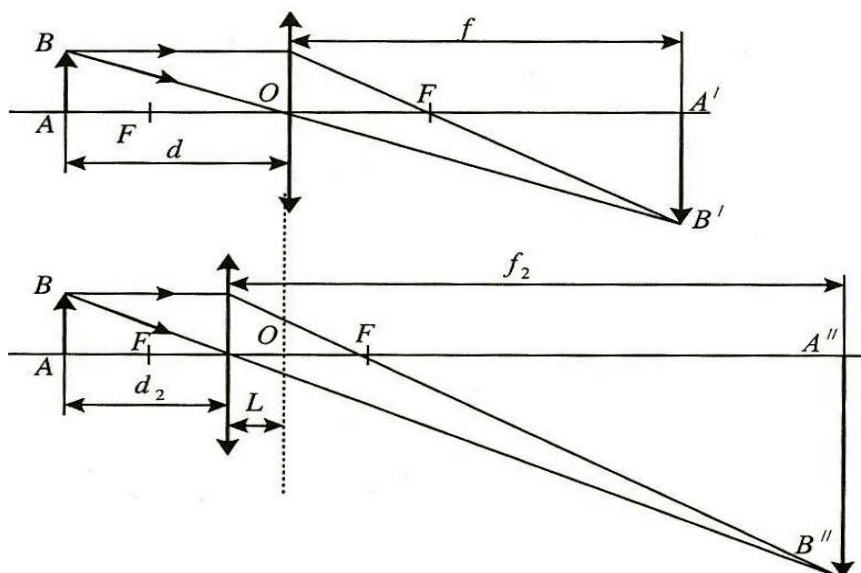


Рис.24

Запишемо рівняння для такої лінзи щодо обох положень:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d_2} + \frac{1}{f_2}. \quad (2)$$

Порівнявши обидва рисунки і уважно прочитавши умову задачі, одержимо

$$d + f = L_1,$$

$$d_2 = d - L,$$

$$f_2 = f + L.$$

Підставивши вирази для d_2 і f_2 в рівняння (2), отримаємо систему рівнянь

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f},$$

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d - L} + \frac{1}{f + L},$$

$$d + f = L_1.$$

Розв'яжемо цю систему відносно d і f :

$$d = \frac{L + L_1}{2}, \quad f = \frac{L_1 - L}{2}.$$

Підставимо вирази d і f в рівняння (1) і знайдемо фокусну відстань для лінзи

$$F = \frac{dF}{d + F} \Rightarrow F = \frac{L_1^2 - L}{4L_1}.$$

Задача 12. Точкове джерело світла розміщене на відстані $d_1 = 30 \text{ см}$ від збірної лінзи з фокусною відстань $F_1 = 5 \text{ см}$. За першою лінзою

розмістили розсіювальну лінзу, але так, що система дає дійсне зображення джерела з лінійним збільшенням $k=1$ на відстані $a=18\text{ см}$ від першої лінзи. Знайти положення розсіювальної лінзи та її фокусну відстань.

Розв'язання. Зробимо чіткий схематичний рисунок (рис.25).

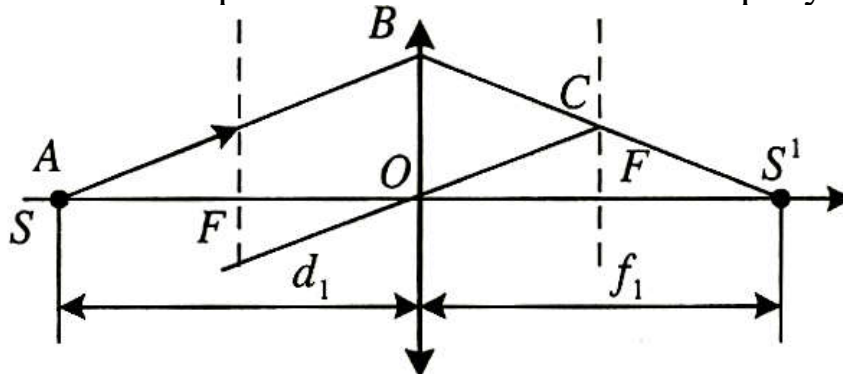


Рис.25

Побудуємо проміжне зображення точки S , не враховуючи наявності лінзи L_2 . Проведемо довільний промінь AB (джерело світла розміщено в точці A). Щоб знайти хід променя AB після заломлення на лінзі, проведемо побічну оптичну вісь, яка буде паралельною до променя AB , і фокальну площину, що проходить через правий фокус збірної лінзи. Після заломлення промінь проходить через точку C (точку перетину фокальної площини і побічної оптичної осі). Зображення, яке дає лінза S' , буде на перетині променя BC і з головної оптичної осі.

Запишемо формулу тонкої збірної лінзи і формулу для пошуку збільшення, яке дає лінза.

$$\frac{1}{F_1} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1}, \quad (1)$$

$$k_1 = \frac{f_1}{d_1}. \quad (2)$$

Побудуємо зображення точки S' при наявності лінзи L_2 . Проведемо побічну оптичну вісь, яка буде паралельною променю BC , і фокальну площину, що проходить через лівий фокус розсіювальної лінзи.

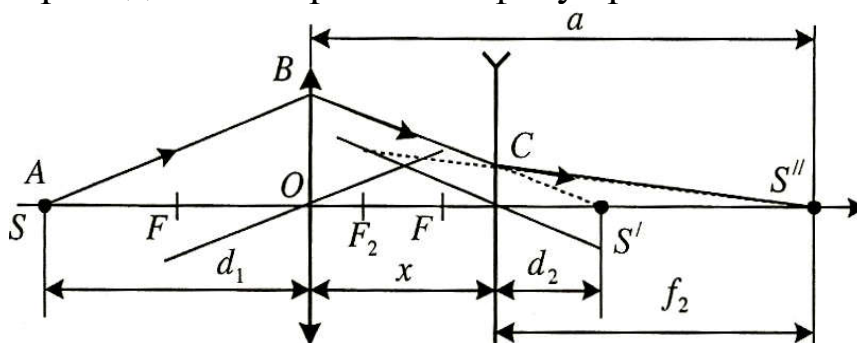


Рис. 26

Запишемо рівняння для тонкої розсіювальної лінзи:

$$-\frac{1}{F_2} = -\frac{1}{d_2} + \frac{1}{f_2}; \quad (3)$$

$$k_2 = f_2 / d_2. \quad (4)$$

Ми отримали чотири рівняння для системи лінз:

$$\frac{1}{F_1} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1}; \quad k_1 = \frac{f_1}{d_1},$$

$$-\frac{1}{F_2} = -\frac{1}{d_2} + \frac{1}{f_2}; \quad k_2 = \frac{f_2}{d_2}.$$

Розглянувши уважно рисунки 25 і 26, робимо висновок, що

$$a = f_2 + x \Rightarrow f_2 = a - x,$$

$$f_1 = d_2 + x \Rightarrow d_2 = f_1 - x.$$

Підставимо вирази для f_2 і d_2 в рівняння (3) і (4) і отримаємо таку систему рівнянь:

$$\frac{1}{F_1} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1}, \quad k_1 = \frac{f_1}{d_1},$$

$$-\frac{1}{F_2} = -\frac{1}{f_1 - x} + \frac{1}{a - x}, \quad k_2 = \frac{a - x}{f_1 - x}.$$

За умовою задачі відомо, що збільшення k системи дорівнює одиниці, а

оскільки $k = k_1 k_2$, то $k = \frac{f_1}{d_1} \frac{a - x}{f_1 - x}$.

Система рівнянь матиме вигляд

$$\frac{1}{F_1} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1}; \quad -\frac{1}{F_2} = -\frac{1}{f_1 - x} + \frac{1}{a - x}; \quad (5)$$

$$k = \frac{f_1}{d_1} \frac{a - x}{f_1 - x}. \quad (6)$$

Оскільки за умовою задачі відомі F_1 і d_1 , то з рівняння (3) знаходимо

$$f_1 = \frac{F_1 d_1}{d_1 - F_1}; \quad f_1 = \frac{0.05 * 0.3}{0.25} = 0.06 \text{ м.}$$

З рівняння (6) знайдемо x :

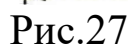
$$kd_1(f_1 - x) = f_1(a - x) \Rightarrow kd_1f_1 - kd_1x = f_1a - f_1x \Rightarrow kd_1x - f_1x = kd_1f_1 - f_1a \Rightarrow x = \frac{kd_1f_1 - f_1a}{kd_1 - f_1} = 0.03 \text{ м.}$$

З рівняння (5) знайдемо фокусну відстань розсіювальної лінзи

$$F_2 = \frac{(a - x)(f_1 - x)}{a - f_1}; \quad F_2 = 0.0375 \text{ м.}$$

Розв'язок: Запишемо формулу тонкої збірної лінзи

Зображення, яке дає лінза, розміщується в точці S_I на відстані f від лінзи. У зворотному напрямку, оскільки на відстані $0,75d$ розміщене дзеркало, предмет буде знаходитись в точці S_o на відстані d від лінзи.



За умовою задачі $f_1 = \frac{d}{2}$. Запишемо формулу лінзи для того випадку, коли промінь проходить лінзу в зворотньому напрямку з точки S_2 ,

Ми отримали систему рівнянь (рівняння (1)-(3)):

$$d_1 = 0.75d + AS_2,$$

Розв'язавши цю систему рівнянь відносно F , дістанемо

47

Отже, $F_1 = \frac{3}{4}d$; $F_2 = \frac{1}{3}d$. Перше значення кореня $F_1 = \frac{3}{4}d$ не підходить за умовою задачі, оскільки $F < f_1$, а $f_1 = \frac{d}{2}$, значить $F < \frac{d}{2}$.

Отже, фокусна відстань розсіювальної лінзи $F = \frac{1}{3}d$.

Задача 14. Уздовж осі OX поширюються в протилежних напрямках дві плоскі хвилі з різними частотами ω і амплітудами $x_{\max}$. Що буде спостерігатися при накладанні цих хвиль?

Розв'язання: Нехай рівняння однієї хвилі матиме вигляд $S_1 = x_{\max} \cos(\omega t + kx)$, де $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ хвильове число; тоді рівняння другої хвилі, яка поширюється назустріч першій, $-S_2 = x_{\max} \cos(\omega t - kx)$.

Внаслідок накладання двох хвиль отримаємо:

$$S = S_1 + S_2 = x_{\max} \cos(\omega t + kx) + x_{\max} \cos(\omega t - kx) = 2x_{\max} \cos \frac{(\omega t + kx) + (\omega t - kx)}{2} + \cos \frac{(\omega t + kx) - (\omega t - kx)}{2}.$$

Оскільки $\cos \frac{(\omega t + kx) + (\omega t - kx)}{2} + \cos \frac{(\omega t + kx) - (\omega t - kx)}{2} = \cos \omega t * \cos kx$, то рівняння набуде вигляду $S = 2x_{\max} \cos \omega t * \cos kx = 2x_{\max} \cos \omega t * \cos \frac{2\pi}{\lambda} x$.

Отже, внаслідок накладання двох хвиль утворилася хвиля з амплітудою $2x_{\max}$. В рівнянні $\cos \frac{2\pi}{\lambda} x = 0$ при $\frac{2\pi}{\lambda} x = \frac{\pi}{2} + n\pi = \frac{\pi}{2}(2n+1)$, де $n = 0, 1, 2, \dots$ Знайдемо відхилення точки, яка здійснює коливальний рух на відстані S . Оскільки $x_n = \frac{\pi}{2k}(2n+1) = \frac{\lambda}{4}(2n+1)$, а $x_{n+1} = \frac{\lambda}{4}[2(n+1)+1]$, то $x_{n+1} - x_n = \frac{\lambda}{2}$ в довільний момент часу. Отже, у даному випадку це стояча хвиля, яка описується рівнянням $S = 2x_{\max} \cos \omega t * \cos \frac{2\pi}{\lambda} x$.

Задача 15. Літак летить горизонтально на висоті $H=4\text{км}$ з надзвуковою швидкістю. Звук доходить до спостерігача через $t=10\text{с}$ після того, як над ним пролетів літак (рис.28). Визначити швидкість літака, якщо швидкість звуку ϑ_0 .

Розв'язання: У точці B знаходиться спостерігач, а в точці A - літак у момент часу t . Із кожної точки, яку пролітає літак, поширюється звукова хвиля. Якщо додати всі звукові хвилі для моменту, коли літак знаходиться у точці A , то отримаємо хвильову поверхню у вигляді конуса

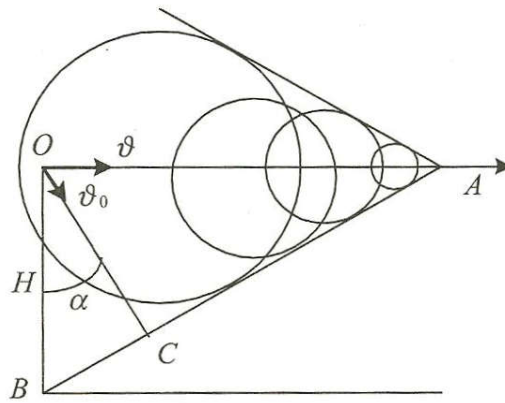


Рис.28

Це так звана ударна звукова хвиля. Розглянемо $\triangle ACO$ і $\triangle OCB$. Із $\triangle ACO$ отримаємо

$$\sin a = \frac{|OC|}{|OA|}, \text{ а з } \triangle OCB - \sin a = \frac{|BC|}{|BO|}.$$

Прирівнявши праві частини рівнянь, маємо $\frac{|OC|}{|OA|} = \frac{|BC|}{|BO|}$.

Оскільки $|OC| = g_0 t$, $|OA| = g t$, $|OB| = H$, а $|BC| = \sqrt{|OB|^2 - |OC|^2} = \sqrt{H^2 - (g_0 t)^2}$, то

$$\frac{g_0 t}{g t} = \frac{\sqrt{H^2 - (g_0 t)^2}}{H} \Rightarrow g = \frac{g_0}{\sqrt{H^2 - (g_0 t)^2}} = 584 \text{ м/с}.$$

Задача 16. Приймач радіосигналів, який стежить за появою супутника Землі над горизонтом, розміщений на березі озера на висоті $H=3\text{м}$ над поверхнею води (рис.29). Відповідно до підйому супутника над горизонтом спостерігається періодична зміна інтенсивності сигналу, що приймається. Визначити частоту радіосигналу супутника, якщо максимум інтенсивності спостерігаються при кутах $\alpha_1 = 3^\circ$ і $\alpha_2 = 6^\circ$.

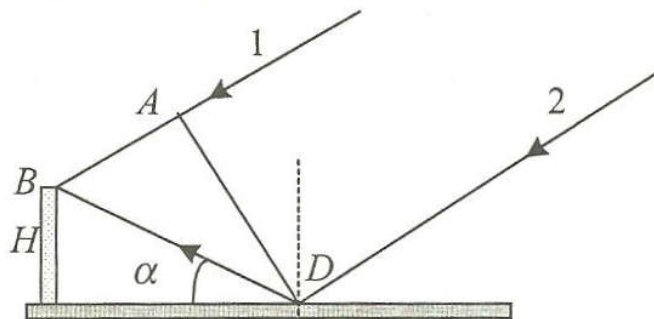


Рис.29

Розв'язання: Оскільки супутник знаходиться на великій відстані від приймача, то електромагнітну хвилю можна вважати плоскою хвилею. На приймач потрапляє промінь 1, що проходить безпосередньо від

супутника, та промінь 2, який проходить від супутника і відбивається від поверхні озера, потрапляє також до приймача радіосигналів.

Визначимо різницю ходу хвиль, яка дорівнюватиме $\Delta L = |BD| - |AB|$. Із $\triangle DCE$ знайдемо $|BD|$: $\sin a = \frac{H}{|BD|} \Rightarrow |BD| = \frac{H}{\sin a}$. Із $\triangle BAD$ визначимо відрізок $|AB|$: $|AB| = |BD| \cos 2a = \frac{H}{\sin a} \cos 2a$. Підставивши значення відрізків $|BD|$ і $|AB|$, отримаємо рівняння для визначення різниці ходу:

$$\Delta L = \frac{H}{\sin a} - \frac{H}{\sin a} \cos 2a = \frac{H}{\sin a} (1 - \cos 2a).$$

Оскільки $1 - \cos 2a = 2 \sin^2 a$, то $\Delta L = 2H \sin a$.

Кут a досить незначний. Тоді $\sin a \approx a$ (вираженому в радіанах), отже, $\Delta L = 2Ha$.

Максимум інтенсивності сигналу буде тоді, коли різниця ходу дорівнюватиме цілому числу довжини хвилі: $\Delta L = n\lambda$. Запишемо умову максимуму для кутів a_1 і a_2 , враховуючи, що $\Delta L = 2Ha$, і знайдемо довжину хвилі радіосигналу супутника:

$$2Ha_1 = n\lambda$$

$$2Ha_2 = (n+1)\lambda \Rightarrow (n+1)\lambda - n\lambda = 2H(a_2 - a_1) \Rightarrow \lambda = 2H(a_2 - a_1).$$

Оскільки $\nu = \frac{c}{\lambda}$, то $\nu = \frac{c}{2H(a_2 - a_1)} = 1,0 \cdot 10^9 \text{ Гц}$.

Задача 17. Коливальний контур приймача складається з котушки і конденсатора з площею пластин $S = 800 \text{ см}^2$ і відстанню між ними $d = 1 \text{ мм}$, заповненого слюдою (діелектрична проникливість $\varepsilon = 7$). На яку довжину хвилі настроїли контур, якщо відомо, що відношення максимальної напруги на конденсаторі до максимального струму в котушці $n = U_0 / I_0 = 100 \text{ В/м}$. Активним опором котушки можна знехтувати.

Розв'язання: Частота вільних коливань у контурі визначається за формулою $\nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, де $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$ — ємність конденсатора; L — індуктивність котушки. Згідно з законом збереження енергії, $W_C - W_M = 0$, де $W_C = \frac{CU_0^2}{2}$; $W_M = \frac{LI_0^2}{2}$.

Рівняння закону збереження енергії набуде вигляду

$$\frac{CU_0^2}{2} = \frac{LI_0^2}{2} \Rightarrow L = C \left(\frac{U_0}{I_0} \right)^2.$$

Оскільки $n = \frac{U_0}{I_0}$ (згідно з умовою задачі), то $L = Cn^2$.

За умови, що контур настроїли на довжину хвилі λ електромагнітного випромінювання, то згідно з умовою резонансу $\nu = \nu_0$. Оскільки $\nu = \frac{c}{\lambda}$, де c – швидкість світла, то

$$\frac{c}{\lambda} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \Rightarrow \lambda = 2\pi c\sqrt{LC} = 2\pi cnC.$$

Підставивши значення ємності конденсатора $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$ в рівняння, отримаємо $\lambda = 2\pi cn \frac{\epsilon\epsilon_0}{d} = 933 \text{ м}$.

Задача 18. *Радіолокатор працює на довжині хвилі $\lambda = 15 \text{ см}$ і випромінює імпульси з частотою $\nu = 4 \text{ кГц}$. Тривалість кожного імпульсу $\tau = 2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$. Яка найбільша дальність виявлення цілі? Скільки коливань в одному імпульсі?*

Розв'язання: Нехай ціль знаходиться на відстані L від радіолокатора. Електромагнітні імпульси проходять до цілі і назад відстань $2L$, поширюючись у просторі зі швидкістю світла. Час, за який імпульс пройде відстань $2L$, становить $t = \frac{2L}{c}$, де c – швидкість електромагнітної хвилі. При цьому назад до радіолокатора електромагнітний імпульс має повернутись до того моменту, коли буде випромінюватись наступний імпульс, тобто $t \leq T_i$, де T_i - час між випромінюванням імпульсів. Оскільки $T_i = \frac{1}{\nu}$, а $t = \frac{2L}{c}$, то

$$\frac{2L}{c} = \frac{1}{\nu} \Rightarrow L = \frac{c}{2\nu} = 3,75 \cdot 10^4 \text{ м}.$$

Радіолокатор випромінює електромагнітні хвилі з частотою $f = \frac{c}{\lambda}$ і періодом $T = \frac{1}{f} = \frac{\lambda}{c}$. Оскільки тривалість одного імпульсу $\tau = 2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, а період $T = \frac{\lambda}{c} = 0,5 \cdot 10^{-9} \text{ с}$, то в одному імпульсі буде $N = \frac{\tau}{T} = 4 \cdot 10^3$ коливань.

Задача 19. *Два когерентних джерела S_1 і S_2 з довжиною хвилі $\lambda = 4 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ знаходяться на відстані $d = 3 \text{ мм}$ один від одного (рис.30). Паралельно лінії, яка з'єднує ці два джерела світла, розміщено екран на відстані $L = 2 \text{ м}$ від них. Що буде спостерігатись в точці А екрана – світло чи темрява?*

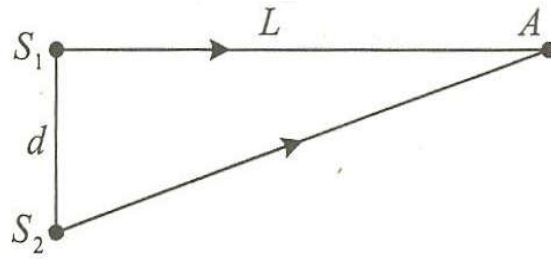


Рис.30

Розв'язання: У даному випадку в точці A буде спостерігатись світло, якщо різниця ходу променів дорівнюватиме цілому числу хвиль, а в протилежному – темрява. Оскільки $|S_2A| = \sqrt{L^2 + d^2}$, а $|S_1A| = L$, то різниця ходу променів визначається за формулою

$$\Delta L = \sqrt{L^2 + d^2} - L = L \sqrt{1 + \left(\frac{d}{L}\right)^2} - L.$$

У випадку, коли $d \ll L$, значить і $\frac{d}{L} \ll 1$, можна використати формулу Ньютона, згідно з якою $\sqrt{1 + \left(\frac{d}{L}\right)^2} \approx 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{d}{L}\right)^2$. Отже, формула для визначення різниці ходу променів набуде вигляду

$$\Delta L = L \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{d}{L}\right)^2 \right] - L = \frac{d^2}{2L}.$$

Записавши умову максимуму для інтерференції, знайдемо n :

$$\Delta L = n\lambda \Rightarrow n = \frac{\Delta L}{\lambda} = \frac{d^2}{2L\lambda} = 1,4.$$

Оскільки $n=1,4$, тобто n – не ціле число, то в точці A буде спостерігатись темрява.

Задача 20. Скільки штрихів на 1мм довжини має дифракційна решітка, якщо зелена лінія ртуті з довжиною хвилі $\lambda = 5,461 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ у спектрі першого порядку спостерігається під кутом $\varphi = 19,8^\circ$? Визначити також найбільший порядок спектра, який може утворити дана дифракційна решітка.

Розв'язання: Використаємо формулу дифракційної решітки $d \sin \varphi = n\lambda$, де λ - довжина хвилі; φ - кут відхилення променя; $n=1$ (згідно з умовою задачі); d – період решітки.

Оскільки $d = \frac{1}{N}$, то формула набуде вигляду

$$\frac{\sin \varphi}{N} = \lambda \Rightarrow N = \frac{\sin \varphi}{\lambda} = 620 \text{ мм}^2.$$

Для того щоб знайти найбільший порядок спектра, знову запишемо формулу дифракційної решітки

$$d \sin \varphi = n\lambda \text{ або } \sin \varphi = nN\lambda.$$

Оскільки $\sin \varphi \leq 1$, то $nN\lambda \leq 1 \Rightarrow n = \frac{1}{N\lambda} = 2,95$.

Враховуючи, що n має бути цілим числом, максимальний порядок спектра дорівнюватиме $n_{\max} = 2$.

Задача 21. *Промені від джерела світла проходять крізь розрізану на дві половини збірну лінзу. Визначити відстань між темними смугами інтерференції, якщо джерело світла знаходиться на відстані $d=15$ см від розрізаної лінзи; фокусна відстань лінзи $F=10$ см; половинки лінзи розсунуті на $d_1=1$ мм; екран розташований на відстані $D=360$ см від лінзи; довжина хвилі монохроматичного світла $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м.*

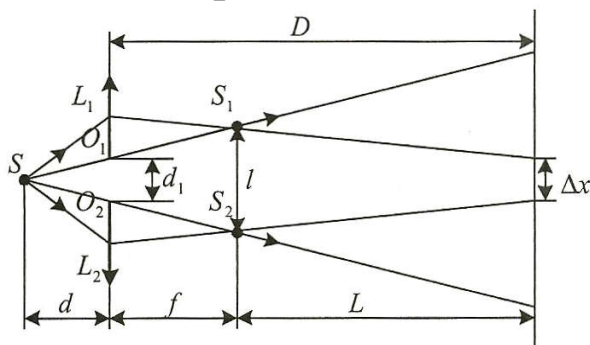


Рис.31

Розв'язання: Після того, як лінзу розрізали, утворилось дві лінзи L_1 і L_2 з оптичними центрами O_1 і O_2 фокусами F_1 і F_2 (рис.31). Оскільки радіуси кривизни не змінились, то фокусна відстань лінз, які утворились, дорівнює фокусній відстані суцільної лінзи.

Світло від джерела S розділиться на два когерентних пучки. Можна вважати, що ці два пучки створені джерелами S_1 і S_2 , які є зображеннями точки S в лінзах L_1 і L_2 .

Для того щоб визначити положення дійсних зображень S_1 і S_2 джерела світла S , скористаємося формулою тонкої лінзи:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} \Rightarrow f = \frac{dF}{d - F}.$$

Визначимо відстань між дійсними зображеннями S_1 і S_2 із подібності трикутників SO_1O_2 і SS_1S_2 :

$$\frac{\frac{1}{2}d_1}{d} = \frac{\frac{1}{2}l}{d + f} \Rightarrow l = \frac{d_1(d + f)}{d} = d_1 \left(1 + \frac{f}{d} \right).$$

Різниця ходу до будь-якої точки M на екрані дорівнюватиме $\Delta L = x \frac{l}{D-f}$.

Підставивши значення l і f в рівняння, отримаємо

$$\Delta L = x \frac{d_1}{D-f} \left(1 + \frac{f}{d} \right) = x \frac{dd_1}{D(d-f) - dF}.$$

Запишемо умову максимуму при інтерференції $\Delta L = n\lambda$, $n = 0, 1, 2, \dots$

Оскільки $\Delta L = x \frac{dd_1}{D(d-f) - dF}$, то $x \frac{dd_1}{D(d-f) - dF} = n\lambda \Rightarrow x = \frac{D(d-f) - dF}{dd_1} n\lambda$.

Рівняння для визначення положення n -ї інтерференційної смуги матиме вигляд

$$x_n = \frac{D(d-f) - dF}{dd_1} n\lambda;$$

Для $(n+1)$ -ї смуги

$$x_{n+1} = \frac{D(d-f) - dF}{dd_1} (n+1)\lambda.$$

Отже, відстань між темними смугами при інтерференції становить

$$\Delta x = \frac{D(d-f) - dF}{dd_1} \lambda = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Задача 22. Червона межа фотоефекту в літію $\lambda_0 = 5,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}$. Яку затримуючу різницю потенціалів необхідно прикласти до фотоелемента, щоб затримати електрони, які вириваються з літію під дією ультрафіолетових променів з довжиною хвилі $\lambda = 2 \cdot 10^{-7} \text{ м}$.

Розв'язання: Запишемо рівняння Ейнштейна для фотоефекту

$$h\nu = A_B + \frac{m_0 v_0^2}{2}.$$

Оскільки, згідно з умовою задачі, відома червона межа фотоефекту для літію, то можна визначити роботу виходу

$$A_B = h\nu_0 = h \frac{c}{\lambda_0},$$

де λ_0 - довжина хвилі червоної межі фотоефекту для літію. Для того щоб електрони не долетіли до анода, необхідно прикласти таку різницю потенціалів, щоб виконувалась умова $e|U| = \frac{m_0 v_0^2}{2}$, де $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

Підставивши значення роботи виходу і кінетичної енергії (і врахувавши, що $\nu = \frac{c}{\lambda}$), в рівняння Ейнштейна для фотоефекту, отримаємо

$$h \frac{c}{\lambda} = h \frac{c}{\lambda_0} + e|U| \Rightarrow |U| = \frac{hc(\lambda_0 - \lambda)}{e\lambda\lambda_0} = 3,8 \text{ В}.$$

Задача 23. Випромінювання аргонowego лазера з довжиною хвилі $\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ сфокусовано на плоскому фотокатоді так, що утворилась пляма діаметром $d = 0,01 \text{ мм}$. Робота виходу фотокатода $A_B = 2 \text{ еВ}$. На плоский анод, який розміщений на відстані $L = 30 \text{ мм}$ від катода (рис.32), подана напруга $U = 4 \cdot 10^3 \text{ В}$. Знайти діаметр плями фотоелектродів на аноді. Анод розміщено паралельно поверхні катода.

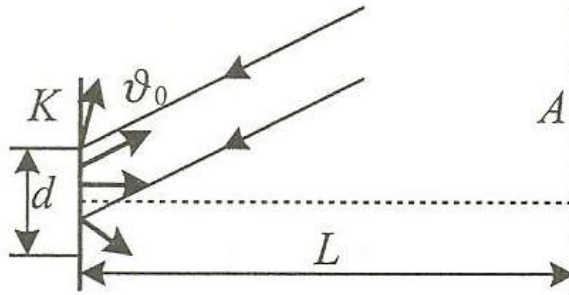


Рис.32

Розв'язання: Зпишемо рівняння Ейнштейна для фотоефекту:

$$h\nu = A_B + \frac{m\vartheta_0^2}{2}.$$

Оскільки $\nu = \frac{c}{\lambda}$, то $h\frac{c}{\lambda} = A_B + \frac{m\vartheta_0^2}{2} \Rightarrow \vartheta_0 = \sqrt{\frac{2(hc - A_B\lambda)}{m_e\lambda}}.$

Електрони, які вириваються із фотокатода, будуть мати вектори швидкості $\vec{\vartheta}_0$, направлені довільно в просторі. Діаметр плями на аноді буде визначатись зміщенням електрона в напрямку осі OY , а воно буде тим більшим, чим більша проекція вектора швидкості на вісь OY і час руху між катодом і анодом. Проекція швидкості буде максимальною тоді, коли швидкість напрямлена вздовж цієї осі (рис.33).

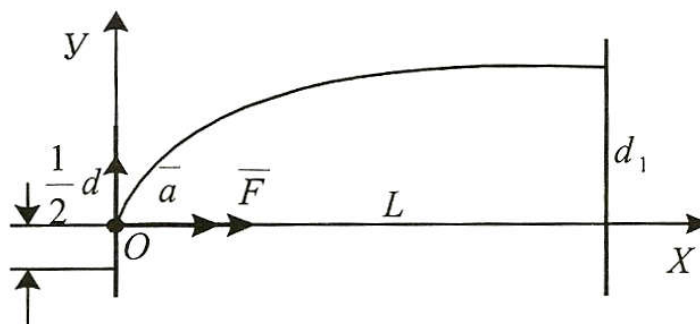


Рис.33

Отже, необхідно розглянути рух електрона з швидкістю, вектор якої напрямлений перпендикулярно до осі OX .

На електрон буде діяти сила електричного поля $\vec{F}$. Згідно з другим законом Ньютона,

$$F = m_0 a \Rightarrow a = \frac{F}{m_0}.$$

Оскільки $F = eE$, а $E = \frac{U}{L}$, то рівняння для визначення прискорення набуде вигляду $a = \frac{eU}{m_0 L}$. Враховуючи, що електрон буде рухатись по параболі, запишемо друге рівняння кінематики в проекціях на осі OX і OY :

$$\frac{L = \frac{at^2}{2}}{d_1 = g_0 t} \Rightarrow d_1 = g_0 \sqrt{\frac{2L}{a}}.$$

Підставивши значення для визначення початкової швидкості і прискорення в дане рівняння, отримаємо

$$d_1 = \sqrt{\frac{2(hc - A_B \lambda)}{m_0 \lambda}} \sqrt{\frac{2L^2 m_0}{eU}} = 2L \sqrt{\frac{hc - A_B \lambda}{eU \lambda}}.$$

Діаметр плями на аноді обчислюється за формулою

$$D = 2 \left(\frac{1}{2} d + d_1 \right) = d + 4L \sqrt{\frac{hc - A_B \lambda}{eU \lambda}}.$$

Підставивши числові значення всіх величин і врахувавши, що $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, отримаємо $D = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Задача 24. *Потужність точкового джерела когерентного світла $P_0 = 10 \text{ Вт}$ на довжині хвилі $\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$. На якій максимальній відстані дане джерело світла буде спостерігатись людиною, якщо людське око неагує на світловий потік $n = 60$ фотонів/с? Діаметр зіниці ока $d = 0,5 \text{ см}$.*

Розв'язання: За проміжок часу Δt точкове джерело світла випромінює енергію $E = P_0 \Delta t$, причому в довільний момент часу ця енергія розподіляється рівномірно по поверхні сфери радіуса R .

Оскільки на одиницю поверхні припадає енергія випромінювання

$$\varepsilon = \frac{E}{S_C} = \frac{P_0 \Delta t}{4\pi R^2}, \text{ де } S_C - \text{площа поверхні сфери, то в зіницю, площа поверхні}$$

якої дорівнює $S_1 = \frac{\pi d^2}{4}$, попадає енергія

$$\varepsilon_1 = S_1 \varepsilon = \frac{P_0 \Delta t}{4\pi R^2} \frac{\pi d^2}{4} = \frac{P_0 \Delta t d^2}{16 R^2}.$$

Нехай за час Δt в зіницю попаде N фотонів; тоді енергія цих фотонів $\varepsilon_1 = N h \nu = N h \frac{c}{\lambda}$. Прирівняємо праві частини рівнянь для визначення енергії

фотонів, які потрапляють у зіницю, і визначаємо радіус сфери, який дорівнюватиме відстані, на якій людина ще зможе спостерігати джерело світла:

$$Nh \frac{c}{\lambda} = \frac{P_0 \Delta t d^2}{16 R^2} \Rightarrow R = \frac{d}{4} \sqrt{\frac{P_0 \Delta t \lambda}{Nh c}}.$$

Оскільки $n = \frac{N}{\Delta t}$, рівняння набуде вигляду

$$R = \frac{d}{4} \sqrt{\frac{P_0 \lambda}{n h c}} = 1,0 * 10^6 \text{ м.}$$

Задачі для самостійного розв'язування

1. Дві люди - далекозорий і короткозорий, надівши свої окуляри, бачать так само, як чоловік з нормальним зором. Одного разу вони помінялися окулярами. Надівши окуляри короткозорого, далекозорого виявив, що він може виразно бачити тільки нескінченно видалені предмети. На якій найменшій відстані а зможе читати дрібний шрифт короткозорий в окулярах далекозорого?

2. Лупа, що є двоопуклою лінзою, виготовлена з скла з показником заломлення $n = 1,6$. Радіуси кривизни поверхонь лінзи однакові і рівні $R = 12$ см. Визначите кутове збільшення γ лупи.

3. Лупа дає кутове збільшення $\gamma_0 = 2$. Впритул до неї приклали збираючу лінзу з оптичною силою $D_1 = 20$ дптр. Яке кутове збільшення γ даватиме така складена лупа?

4. Предмет розглядають в лупу, розташувавши його у фокальній площині лупи. При цьому предмет виглядає збільшеним в k раз. Яке максимальне збільшення k' може дати ця лупа?

5. Фотографуючи кратер Місяця, фотопластину розташовують у фокальній площині об'єктиву телескопа з фокусною відстанню $F = 4,5$ м. Визначите діаметр D кратера, якщо діаметр його зображення $D_0 = 0,72$ мм. Відстань до поверхні Місяця $L = 3,8 * 10^5$ км.

6. Телескоп складається з двох збираючих лінз (зорова труба Кеплера) - об'єктиву з фокусною відстанню $F_1 = 4,5$ м і окуляра з фокусною відстанню $F_2 = 45$ мм. Налаштувавши телескоп на нескінченність, фотографують Сонце за допомогою фотокамери з фокусною відстанню $F_3 = 30$ см. Який діаметр D зображення Сонця на фотопластині, якщо кутовий діаметр Сонця рівний $\varphi = 30'$?

7. Спостерігач з нормальним зором розглядає Місяць в телескоп, об'єктив і окуляр якого мають фокусні відстані $F_{об} = 2 \text{ м}$ і $F_{ок} = 5 \text{ см}$. На яку відстань ΔL потрібно розсунути трубу, щоб отримати зображення Місяця на екрані на відстані $f_2 = 25 \text{ см}$ від окуляра? Який буде при цьому діаметр D зображення Місяця, якщо неозброєним оком її видно під кутом $\alpha = 30'/?$

8. Об'єктивом театрального бінокля (труба Галілея) служить збираюча лінза з фокусною відстанню $F_1 = 8 \text{ см}$, а окуляром - розсіююча лінза з фокусною відстанню $F_2 = -4 \text{ см}$. Визначите відстань α між об'єктивом і окуляром, якщо зображення розглядається з відстані якнайкращого зору нормального ока $d_0 = 25 \text{ див}$. Вказівка: побудуйте зображення нескінченно видаленого предмету.

9. Фокусні відстані об'єктиву і окуляра в трубі Галілея $F_1 = 45 \text{ см}$ і $F_2 = -5 \text{ см}$. При заміні лінз в трубі на дві що збирають вийшла труба Кеплера з тим же збільшенням, що і труба Галілея. Знайдіть фокусні відстані F_3 і F_4 цих лінз.

10. Збільшення мікроскопа $k = 600$. Визначите оптичну силу $D_{об}$ об'єктиву, якщо фокусна відстань окуляра $F_{ок} = 4 \text{ см}$, а довжина тубуса $L = 24 \text{ див}$.

11. Фокусна відстань об'єктиву мікроскопа $F_{ок} = 0,5 \text{ см}$. Відстань між окуляром і об'єктивом мікроскопа рівна $L = 16 \text{ див}$. Збільшення мікроскопа $k = 200$. Знайдіть збільшення окуляра $k_{ок}$. Вказівка: скористайтесь формулою $k = k_{ок} * k_{об}$.

12. У мікроскопі фокусна відстань об'єктиву $F_1 = 5,4 \text{ мм}$, а окуляра $F_2 = 2 \text{ см}$. Предмет знаходиться на відстані $d_1 = 5,6 \text{ мм}$ від об'єктиву. Визначите збільшення мікроскопа для нормального ока і довжину тубуса L (відстань між об'єктивом і окуляром).

13. Сталева кулька вільно падає з висоти $h = 0,8 \text{ м}$ на збираючу лінзу і розбиває її. У початковий момент відстань від кульки до лінзи дорівнювала відстані від лінзи до дійсного зображення кульки. Протягом якого проміжку часу τ існувало зображення кульки?

14. Лінзу з оптичною силою $D = 8 \text{ дптр}$ переміщують з постійною швидкістю від джерела світла до екрану, що знаходиться на відстані $L = 2,4 \text{ м}$ від джерела. В процесі переміщення на екрані двічі з інтервалом часу $\tau = 5 \text{ с}$ виникли різкі зображення джерела. З якою швидкістю v переміщується лінза?

Таблиця задач

№ варіанту	1	2	3	4
1	1	31	61	91
2	2	32	62	92
3	3	33	63	93
4	4	34	64	94
5	5	35	65	95
6	6	36	66	96
7	7	37	67	97
8	8	38	68	98
9	9	39	69	99
10	10	40	70	100
11	11	41	71	101
12	12	42	72	102
13	13	43	73	103
14	14	44	74	104
15	15	45	75	105
16	16	46	76	106
17	17	47	77	107
18	18	48	78	108
19	19	49	79	109
20	20	50	80	110
21	21	51	81	111
22	22	52	82	112
23	23	53	83	113
24	24	54	84	114
25	25	55	85	115
26	26	56	86	116
27	27	57	87	117
28	28	58	88	118
29	29	59	89	119
30	30	60	90	120

Задачі для контрольної роботи

1. На дні посудини, яка заповнена водою, лежить плоске дзеркало. Людина, яка нахилилась над посудиною, бачить зображення A' свого ока A в дзеркалі на відстані $d = 25 \text{ см}$. Відстань від ока до поверхні води $h = 5 \text{ см}$. Показник заломлення води $n = 4/3$. Визначити глибину рідини в посудині.

2. Промінь світла відбивається від плоского дзеркала, потрапляючи на нього під кутом $\alpha = 30^\circ$. На яку відстань зміститься відбитий від дзеркала промінь, якщо поверхню дзеркала закрити склом товщиною $d = 3 \text{ см}$? Показник заломлення $n = 1,5$.

3. Людина розглядає зіницю свого ока в плоскому дзеркалі товщиною $L = 1,5 \text{ см}$. на відстані найкращого зору ($d_0 = 25 \text{ см}$). На якій відстані від дзеркала розташоване око людини? Показник заломлення скла $n = 1,5$.

4. Яка товщина H плоскопаралельної пластинки, якщо точку, що нанесена чорнилом на нижньому боці пластинки, спостерігач бачить на відстані $h = 5 \text{ см}$ від поверхні? Промінь зору перпендикулярний до поверхні пластинки. Показник заломлення скла $n = 1,6$. Для малих кутів $\text{tg } \alpha \approx \sin \alpha \approx \alpha$.

5. Світну точку S , що знаходиться в середовищі з показником заломлення $n_1 = 1,33$, розглядають із середовища з показником заломлення $n_2 = 1,5$ під невеликим кутом до нормалі, яка проведена до межі поділу двох середовищ. Якою буде уявна відстань від точки S до поділу середовищ, якщо справжня відстань $h = 0,133 \text{ м}$?

6. Поверхня озера глибиною $H = 1,3 \text{ м}$ покрита тонким шаром льоду із снігом, який практично не пропускає світло. Знайти площу світлої плями на дні озера від ополонки у формі кола радіусом $R = 2 \text{ м}$. Озеро освітлюється розсіяним світлом. Показник заломлення води $n = 4/3$.

7. На спокійній поверхні водойми з'явилась брудна пляма радіусом $R = 5 \text{ м}$, яка не пропускає світла. Визначити розмір тіні на дні водойми. Поверхня води освітлюється розсіяним світлом. Глибина водойми $H = 2,6 \text{ м}$. Показник заломлення води $n = 4/3$. Відбивання від дна не враховувати.

8. На дні басейну лежить предмет. На відстані $H = 20 \text{ см}$ від поверхні води розташована збирна лінза з фокусною відстанню $F = 10 \text{ см}$. На відстані $b = 12,5 \text{ см}$ від лінзи знаходиться зображення предмета.

Визначити глибину басейну h , якщо показник заломлення води $n = 4/3$ (кути вважати малими).

9. Куля із оптично прозорого матеріалу поміщена в паралельний пучок світла. Кут падіння одного із променів на поверхню кулі $\varphi = \arctg(4/3)$. Кут його віхилення від початкового напрямку після двох заломлень на поверхні кулі $\delta = 2\arctg(7/24)$. Знайти показник заломлення матеріалу кулі.

10. Один торець скляної однорідної палички є площиною, яка перпендикулярна до її осі, а другий - частиною сфери, центр якої лежить на цій самій осі. Тонкий паралельний пучок світла, який проходить вздовж осі палички збоку плоского торця, фокусується на відстані a_1 від сферичного торця, а той, що проходить збоку сферичного торця - на відстані a_2 від нього всередині палички. Визначити показник заломлення скла.

11. Із скла з показником заломлення $1,6$ необхідно виготовити подвійно випуклу лінзу з фокусною відстанню 20 см. Якими мають бути радіуси кривизни поверхні лінзи, якщо один із них у $1,5$ рази більший від іншого?

12. Над столом підвішена маленька лампочка, яка розміщена у вершині конусоподібного абажура, в якого кут між віссю і твірною $\alpha = 30^\circ$. На шляху променів паралельно до поверхні столу помістили плоскопаралельну скляну пластинку з показником заломлення $n = 1,5$. При цьому діаметр світлової плями на столі зменшився в розмірі на $d = 2$ см. Яка товщина h пластинки?

13. Перед ввігнутим дзеркалом з оптичною силою $D = 2$ дптр на головній оптичній осі знаходиться точкове джерело світла, віддалене від вершини дзеркала на відстань $d = 102$ см. Між дзеркалом і джерелом поставили плоскопаралельну скляну пластинку з показником заломлення $n = 1,5$. Якою повинна бути товщина x пластинки, щоб зображення збіглося з самим джерелом?

14. На столі поставлена скляна призма з кутом заломлення $\theta = 45^\circ$ і показником заломлення скла n та тонка лінза з фокусною відстанню F . Головна оптична вісь лінзи перпендикулярна до вертикальної грані призми, на яку спрямовано горизонтальний пучок світла певної довжини хвилі. На який відстані від головної оптичної осі буде знаходитися точка, в якій зійдуться промені, що пройшли через призму і лінзу?

15. Циліндрична посудина з непрозорими стінками розміщена так, що око спостерігача не бачить дна посудини, але повністю бачить твірну

циліндра CD (рис.34). Висота циліндра a дорівнює 40 см і дорівнює його діаметру. Який об'єм води необхідно налити в посудину, щоб спостерігач зміг побачити маленький предмет F , який знаходиться на відстані $b = 10\text{ см}$ від точки D ? Коефіцієнт заломлення води $n = 1,3$.

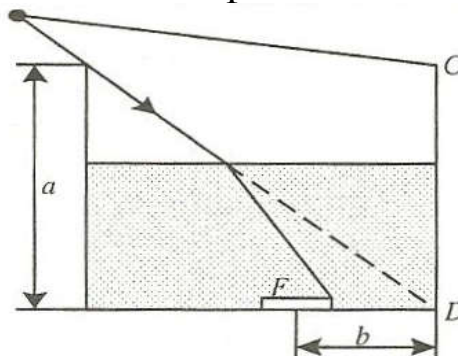


Рис.34

16. Промінь світла, який лежить у площині рисунка, падає на бокову грань AB призми, що має при вершині кут $\theta = 90^\circ$ (рис.35). В яких межах знаходяться можливі значення кута падіння α , коли відомо, що промінь виходить із бокової грані AC ? Показник заломлення призми $n = 1,25$.

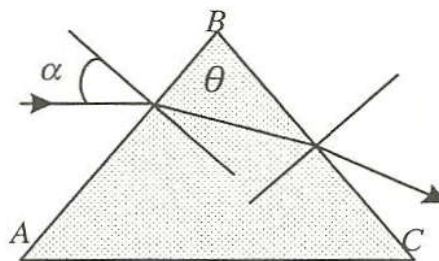


Рис.35

17. Паралельний пучок світла спрямовується збіркою лінзою на катод фотоелемента. Фокусна відстань лінзи F є значно більшою за її діаметр D . Взаємне розміщення лінзи і фотоелемента таке, що круглий фотокатод, діаметр якого d , точно перекриває світловий потік. При цьому гальванометр у колі фотоелемента показує струм I . Який струм покаже гальванометр, якщо між лінзою і фотоелементом, не змінюючи їх положення, поставити плоскопаралельну пластинку товщиною H з показником заломлення n ?

18. Тонка збирна лінза з фокусною відстанню $F = 15\text{ см}$ прикріплена до стінки акваріума, який заповнений водою ($n = 4/3$). На лінзу під кутом α падає паралельний пучок світла. Відомо, що промінь, який пройшов крізь лінзу на відстані h від її оптичного центра, не змінює свого напрямку. Знайти кут α , якщо $h = 5\text{ мм}$.

19. Тонка розсіювальна лінза з фокусною відстанню $F = 15$ см прикріплена до стінки акваріума, який заповнений водою ($n = 4/3$). На лінзу під кутом α падає паралельний пучок світла. Відомо, що промінь, який пройшов крізь лінзу на відстані h від її оптичного центра, не змінює свого напрямку. Знайти відстань h , якщо $\operatorname{tg} \alpha = 0,08$.

20. В трубці довжиною $l = 80$ см, яка закрита з обох сторін, знаходиться поршень із збірною лінзою, фокусна відстань якої $F = 19$ см. Коли трубка горизонтальна і нерухома, поршень знаходиться посередині і тиск газу в обох частинах дорівнює $p_0 = 1,5$ мм рт. ст. З яким прискоренням необхідно рухати трубку в горизонтальному напрямку, щоб зображення джерела світла A , що знаходиться на одній з бокових сторін, було на задній стороні трубки? Маса поршня з лінзою $m = 30$ г, площа перерізу трубки $S = 25$ см²; тертя відсутнє; поршень газу не пропускає. Температура газу постійна.

21. Маємо збірну лінзу з фокусною відстанню $F = 10$ см і екран, який розміщено в її фокальній площині. З іншого боку від лінзи в її фокусі знаходиться точкове джерело світла, яке в деякий момент починає віддалятися від лінзи з постійним прискоренням $a = 4$ м/с. Через який проміжок часу t після початку руху радіус світлової плями на екрані зменшиться в $n = 6$ разів?

22. На головній оптичній осі позитивної лінзи з фокусною відстанню 5 см лежить спиця. Лінза створює дійсне зображення спиці. Спицю пересунули паралельно самій собі і перпендикулярно до головної оптичної осі на відстань h . При цьому довжина зображення спиці збільшилася в 1,2 рази. Знайти h ?

23. Паралельно головній оптичній осі тонкої від'ємної лінзи на відстані 6 см від осі розміщено прямолінійний шматок дроту. Якщо, не змінюючи відстані від дроту до лінзи, перемістити дріт на головну оптичну вісь, то довжина його зображення зменшиться в 1,3 рази. Визначити фокусну відстань лінзи.

24. Сірник лежить на прямій, паралельній головній оптичній осі тонкої позитивної лінзи, так, що її найближчий кінець B знаходиться на відстані $a = 81$ мм від площини лінзи. Відстань між головною оптичною віссю лінзи і сірником $b = 9$ мм. Відомо, що довжина зображення сірника в два рази менша за довжину самого сірника. Знайти довжину сірника, якщо фокусна відстань лінзи $F = 40$ мм.

25. На осі тонкої від'ємної лінзи розміщена трапеція таким чином, що її паралельні сторони перпендикулярні до головної оптичної осі.

Лінза створює зображення трапеції, яка має вигляд прямокутника. При цьому менша з паралельних сторін зображується із збільшенням $\Gamma_1 = 1/3$. Якщо трапецію пересунути вздовж головної осі на деяку відстань, то отримаємо зображення у вигляді трапеції з тими самими кутами. Знайти, з яким збільшенням зображується та сама менша сторона у цьому випадку.

26. Математичний маятник коливається в площині рисунка з амплітудою $A = 1$ см. Рівноважне положення нитки маятника знаходиться на відстані $a = 4$ см від тонкої від'ємної лінзи з фокусною відстанню $F = 2$ см. Знайти відстань між зображеннями маятника, що лежать на головній оптичній осі системи.

27. Лінза з фокусною відстанню 3 см створює перевернуте зображення предмета. Відстані від предмета до лінзи і від лінзи до зображення розрізняються на 8 см. З яким збільшенням зображується предмет?

28. При деякому положенні предмета лупа дала зображення із збільшенням $\Gamma_1 = 5$. Як зміниться збільшення лупи при зменшенні відстані предмета від лупи в $k = 1,5$ рази?

29. На головній оптичній осі збірної лінзи розміщені дві світні точки на відстанях $d_1 = 20$ см і $d_2 = 40$ см від лінзи. Знаючи, що їх зображення знаходяться в одній і тій самій точці, визначити фокусну відстань лінзи.

30. Переміщуючи лінзу між предметом і екраном, знайшли два положення, при яких лінза дає на екрані чітке зображення предмета. Знайти висоту предмета, якщо висота першого зображення h_1 , а другого h_2 .

31. На оптичній осі збірної лінзи на відстані $d = 25$ см від лінзи розміщене точкове джерело світла. З другого боку лінзи ставиться екран - спершу на відстані $a = 27$ см, а потім на відстані $b = 48$ см. Освітленість центра світлової плями на екрані в обох випадках виявляється однаковою. Визначити фокусну відстань F лінзи.

32. Вздовж прямої, яка паралельна головній оптичній осі лінзи і знаходиться від неї на відстані 5 см, повзе до лінзи комахка з постійною швидкістю $v_0 = 16$ см/с. Знайти швидкість переміщення зображення комахки в той момент, коли вона проповзе через фокальну площину лінзи. Лінза тонка, розсіювальна, з фокусною відстанню $F = 10$ см.

33. Дійсне зображення предмета, яке отримали за допомогою збірної лінзи, знаходиться від неї на відстані $f_1 = 80$ см. Збірну лінзу замінюють

розсіювальною з такою самою фокусною відстанню. Зображення предмета в цьому випадку знаходиться на відстані $f_2 = 20\text{ см}$. Визначити фокусні відстані лінз і збільшення Γ_1 і Γ_2 .

34. У круглий отвір у непрозорому екрані встановлена розсіювальна лінза з фокусною відстанню $F=10\text{ см}$, на яку падає пучок світлових променів, паралельний її головній оптичній осі. На відстані $L=30\text{ см}$ від лінзи паралельно площині лінзи розміщено екран. Яку фокусну відстань повинна мати збирна лінза, щоб під час заміни нею розсіювальної лінзи радіус світлового круга на екрані не змінився?

35. Предмет розміщується на відстані 90 см від екрану. Між предметом і екраном переміщують лінзу, причому в одному положенні лінзи на екрані виходить збільшене зображення предмета, а у другому – зменшене. Яка фокусна відстань лінзи, якщо лінійні розміри першого зображення в 4 рази більші за розміри другого?

36. Дійсне зображення точки, яка світиться, отримують на відстані $f=8\text{ см}$ від лінзи і на $h=2\text{ см}$ нижче від її головної оптичної осі. На якій найменшій відстані перед лінзою необхідно поставити екран, що має форму верхньої частини лінзи, щоб зображення точки зникло? Фокусна відстань лінзи $F=5\text{ см}$, її радіус $R=5\text{ см}$.

37. Точка починає рухатись вздовж оптичної осі збирної лінзи з фокусом 50 см , коли знаходиться на відстані 80 см від неї, і наближається до лінзи зі швидкістю $0,8\text{ м/с}$. Знайти шлях, який проходить зображення точки за 1 с руху.

38. Відстань від предмета до переднього фокуса лінзи втричі менша, ніж відстань від його зображення до заднього фокуса. На скільки зміниться відстань між предметом і його зображенням, якщо предмет наблизити до лінзи на відстань L ? Фокусна відстань лінзи F .

39. Джерело світла розміщене на подвійній фокусній відстані від збирної лінзи на її оптичній осі. За лінзою перпендикулярно до оптичної осі помістили плоске дзеркало. Промені світла, які пройшли крізь лінзу, відбиваються від дзеркала, повторно проходять крізь лінзу і виходять із неї паралельним пучком. Визначити відстань від лінзи до дзеркала.

40. Оптична система складається із збирної лінзи з фокусною відстанню $F=30\text{ см}$ і плоского дзеркала, що знаходиться на відстані $L=15\text{ см}$ від лінзи. Визначити положення зображення, яке дає ця система, якщо предмет знаходиться на відстані $d = 15\text{ см}$ перед лінзою.

41. На яку відстань зміститься фокус довгофокусної збирної лінзи, якщо на шляху променів, що пройшли крізь лінзу, перпендикулярно до

головної осі розмістити плоскопаралельну скляну пластинку товщиною $d = 6 \text{ см}$ з показником заломлення $n = 1,5$? Пластинка встановлена впритул до лінзи. Діаметр лінзи набагато менший від її фокусної відстані.

42. Дві збірні лінзи з фокусами 10 см і 12 см співвісні і знаходяться одна від одної на відстані 35 см . Відстань між предметом і найближчою (першою) лінзою 30 см . Знайти положення зображення і збільшення системи.

43. Дві однакові збірні лінзи з фокусною відстанню F розташовані так, що їх головні оптичні осі утворюють кут α , і вісь другої лінзи проходить через центр O_1 першої. У фокусі першої лінзи розташоване точкове джерело світла S_0 . Знайти відстань $|S_0 S|$ між джерелом S_0 і його зображенням S у системі лінз, якщо відстань між центрами лінз $|O_1 O_2| = 2F$.

44. Оптична система складається із збірної і розсіювальної лінз. Відстань між лінзами 25 см , фокусна відстань розсіювальної лінзи 15 см , а предмет знаходиться на відстані $1,5F_1$ (від збірної лінзи). Знайти фокусну відстань збірної лінзи, якщо зображення, яке дає система, знаходиться на відстані $10,5 \text{ см}$ від розсіювальної лінзи.

45. Є оптична система із збірної і розсіювальної лінз, оптичні осі яких збігаються. Фокусні відстані лінз рівні за модулем, $F = 20 \text{ см}$. Лінзи розміщені на відстані $L = 25 \text{ см}$ одна від одної. Де на оптичній осі необхідно розмістити точкове джерело, щоб система давала паралельний пучок променів?

46. Оптична система складається із двох лінз з фокусними відстанями $F = 30 \text{ см}$ кожна, які розміщені на відстані $L = 15 \text{ см}$ одна від одної. При яких положеннях предмета система дає уявне зображення?

47. Об'єктив фотоапарата виготовлений із двох лінз - розсіювальної і збірної. Розсіювальна лінза з $F_1 = 5 \text{ см}$ знаходиться на відстані $L = 45 \text{ см}$ від фотоплівки. Де необхідно розмістити збірну лінзу з $F_2 = 8 \text{ см}$, щоб на плівці отримати різкі зображення віддалених предметів?

48. Точкове ізотропне джерело створює повний світловий потік $\Phi_0 = 200 \text{ лм}$. Яка сила світла I цього джерела? Який світловий потік Φ падає на лист паперу площі $S = 1 \text{ дм}^2$, розташований на відстані $R = 2 \text{ м}$ від джерела так, що промені світла падають на нього під кутом $\alpha = 45^\circ$? Визначте освітленість E цього листа паперу.

49. Людське око сприймає в темноті світловий потік, рівний $\Phi_0 = 10\text{--}13 \text{ лм}$, поверхня зіниці ока в темноті $S = 0,4 \text{ см}^2$. Визначите, з якої

найбільшої відстані L можна помітити світло кишенькового ліхтаря, сила світла якого $I = 5 \cdot 10^{-2}$ кд.

50. На якій висоті H над креслярською дошкою слід повісити лампу потужності $P = 200$ Вт, щоб отримати освітленість дошки під лампою $E = 50$ лк? Світловидатність лампи $L = 12$ лм/Вт. Нахил дошки до горизонту $\alpha = 30^\circ$.

51. Для друкування фотознімку потрібний час експозиції $t_1 = 1$ с при силі світла лампи $I_1 = 100$ кд. Яка повинна бути експозиція t_2 при заміні цієї лампи на лампу з силою світла $I_2 = 60$ кд? В обох випадках фотознімок повинен отримати однакову світлову енергію.

52. Визначите силу світла I лампи вуличного освітлення, необхідну для того, щоб освітленість на землі посередині між двома ліхтарями була рівна $E = 0,2$ лк. Лампи підвішені на висоті $h = 10$ м, відстань між стовпами $L = 40$ м.

53. Два точкові джерела, сили світла яких $I_1 = 80$ кд і $I_2 = 125$ кд, знаходяться на відстані $L = 3,6$ м один від одного. На якій відстані x від першого джерела на прямій, що сполучає джерела, треба помістити невеликий плоский екран, щоб його освітленість була однаковою з обох боків?

54. Точкове джерело світла поміщене на деякій відстані L від екрану і дає в центрі екрану освітленість $E = 1$ лк. Яка буде освітленість центру екрану E_1 , якщо по іншу сторону від джерела на тій же відстані L помістити плоске дзеркало, що ідеально віддзеркалює зображення?

55. Точкове джерело світла S освітлює поверхню AB (див. рис. 36). В скільки n разів збільшиться освітленість поверхні в точці O , якщо збоку від джерела світла на відстані $SD = SC$ помістити плоске дзеркало, що відображає промінь SD в точку C ?

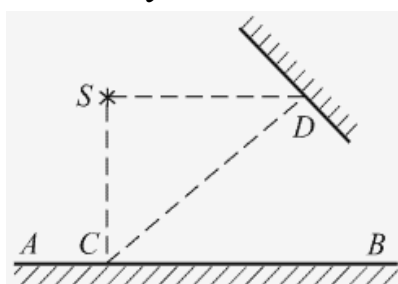


Рис.36

56. Точкове джерело світла знаходиться на відстані $d = 20$ см від увігнутого сферичного дзеркала радіусу $R = 50$ див. Знайдіть освітленість

E_1 в центрі екрану, розташованого перпендикулярно головній оптичній осі дзеркала на відстані $L_1 = 80$ від полюса, якщо при видаленні екрану на $L_2 = 100$ см освітленість в його центрі дорівнює $E_2 = 300$ лк.

57. У головному фокусі увігнутого дзеркала з радіусом кривизни $R = 2$ м знаходиться точкове джерело світла. На відстані $L = 10$ м від джерела поміщений екран, перпендикулярний головній оптичній осі дзеркала. У скільки разів освітленість E_1 в центрі світлової плями на екрані перевищує освітленість E_0 в тому ж місці екрану при відсутності дзеркала?

58. На висоті $h > 1$ м від поверхні стола знаходиться точкове джерело світла силою $I = 25$ кд. Яка буде освітленість E в точці, розташованій під джерелом, якщо на шляху променів поміщена горизонтальна лінза оптичної сили $D = 1$ дптр так, що джерело знаходиться в її фокусі?

59. На відстані $L = 1$ м від екрану знаходиться матова лампочка. За допомогою лінзи, переміщуючи останню, двічі отримують на екрані чітке зображення лампочки. Освітленості зображень при цьому відрізняються в $n = 9$ разів. Визначите фокусну відстань F лінзи.

60. Точкове джерело світла S знаходиться на відстані $L = 1$ м від екрану. В екрані навпроти джерела зроблений отвір діаметром $d = 1$ см, в котрий проходить світло. Між джерелом і екраном поміщають прозорий циліндр, показник заломлення якого рівний $n = 1,5$, довжина $L = 1$ м, а діаметр рівний діаметру отвору (див. рис. 37). У скільки разів зміниться світловий потік Φ через отвір?

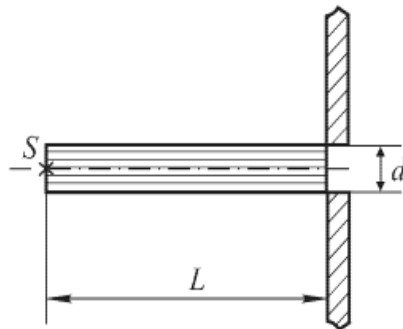


Рис.37

61. Оптична система складається з двох збираючих лінз з однаковими фокусними відстанями F , закріплених на кінцях трубки завдовжки $2F$. Посередині трубки розміщена діафрагма. Трубка освітлюється пучком світла, паралельним головній оптичній осі цієї системи. Після того, як перед першою лінзою помістили матове скло, освітленість плями на виході системи зменшилась в $n = 10$ разів. У скільки n / разів зменшиться освітленість, якщо товщина матового скла збільшиться в два рази?

62. Визначите швидкість світла v в деякій рідині, якщо при падінні променя з повітря на поверхню рідини під кутом $\alpha = 45^\circ$ кут заломлення рівний $\beta = 30^\circ$.

63. Промінь світла падає на межу розділу двох середовищ під кутом $\alpha = 30^\circ$. Показник заломлення першого середовища $n_1 = 2,4$. Визначите показник заломлення n_2 другого середовища, якщо відомо, що відбитий і заломлений промені перпендикулярні один одному (кут падіння променя на межу розділу середовищ в цьому випадку називають кутом Брюстера; ступінь поляризації відбитого світла при цьому максимальний).

64. Два взаємно перпендикулярних променя падають з повітря на поверхню рідини. Який показник заломлення рідини n , якщо кут заломлення для одного променя рівний $\beta_1 = 36^\circ$, для іншого – $\beta_2 = 20^\circ$?

65. Під яким кутом α повинен падати промінь на поверхню скла, щоб кут заломлення був в $k = 2$ рази менше кута падіння?

66. Визначите кут падіння α променя на поверхню води, якщо відомо, що він більше кута заломлення на $\theta = 10^\circ$.

67. Визначите кут заломлення β променя при переході з повітря в етиловий спирт ($n = 1,36$), якщо кут між відбитим і заломленим променями рівний $\varphi = 120^\circ$.

68. Свая вбита в дно річки і піднімається над водою на $h_1 = 1,0$ м. Глибина річки $h_2 = 2,0$ м. Визначите довжину тіні сваї L на поверхні води і на дні річки, якщо висота Сонця над горизонтом $\alpha = 30^\circ$.

69. Опишіть, що побачить нирець з-під води крізь ідеально гладку поверхню озера.

70. Промінь світла направлений так, що випробовує повне віддзеркалення на межі води і повітря. Чи зможе він вийти в повітря, якщо на поверхню води налити соняшникову олію, показник заломлення якої більший, ніж у води? Масло з водою не змішується.

71. Чи можуть сонячні промені випробувати повне внутрішнє віддзеркалення усередині дощової краплі? Краплю вважати кулею.

73. Промінь світла виходить з скипидару в повітря. Граничний кут повного внутрішнього віддзеркалення в цьому випадку рівний $\alpha_{\text{пр}} = 42^\circ 23'$. Визначите швидкість v розповсюдження світла в скипидарі.

74. На дні водоймища глибиною $H = 3,0$ м, знаходиться точкове джерело світла. Який мінімальний радіус гмін повинен мати непрозорий круг, плаваючий на поверхні води, щоб з вертольота не можна було виявити це джерело світла? Центр круга знаходиться точно над джерелом.

75. Прозорий кубик лежить на монеті. Монета освітлюється розсіяним світлом. При якому значенні показника заломлення n матеріалу кубика монета не буде видна через його бічну поверхню?

76. У ясний сонячний день водолаз, що стоїть на дні озера, бачить у водному «дзеркалі» у себе над головою віддзеркалення всіх ділянок дна, що знаходяться від нього на відстані $S \geq S_0 = 10$ м. Ріст водолаза $h = 1,7$ м. Визначите глибину H озера.

77. Промінь падає під кутом $\alpha = 60^\circ$ на скляну пластину товщиною $d = 2,0$ см з паралельними гранями. Під яким кутом β промінь, пройшовши крізь пластину, вийде з неї? Який зсув h променів при виході з пластини? Який буде зсув h' , якщо промінь під таким же кутом α падає на цю ж скляну пластину, занурену у воду?

78. Показник заломлення рідини поступово збільшується від значення n_1 у поверхні до n_2 біля дна судини. Промінь падає на поверхню рідини з повітря під кутом α . Визначите кут β падіння променя на дно судини.

79. Нижня поверхня плоско-паралельної скляної пластинки посріблена. На пластинку зверху падає промінь світла під кутом $\alpha = 60^\circ$, внаслідок чого від неї відбиваються два промені, що йдуть на відстані $a = 20$ мм один від одного. Визначите товщину d пластинки.

80. На горизонтальному дні басейну, що має глибину $h = 2,0$ м, лежить плоске дзеркало. Промінь світла, заломившись на поверхні води, відбивається від дзеркала і виходить в повітря. Відстань від точки входу променя у воду до точки виходу відбитого променя з води рівне $L = 1,5$ м. Визначите кут падіння променя α .

81. Предмет знаходиться на відстані $L = 15$ см від скляної плоско-паралельної пластинки. Спостерігач розглядає предмет крізь пластинку, причому промінь зору нормальний до неї. Визначите відстань x від зображення предмету до найближчої до спостерігача грані, якщо товщина пластинки $d = 4,8$ см.

82. Над водою на висоті $h_1 = 1,0$ м помістили горизонтальне плоске дзеркало. На якій висоті h над водою побачить своє віддзеркалення риба, що знаходиться на глибині $h_2 = 0,50$ м?

83. На дні судини, заповненої водою, лежить плоске дзеркало. Людина, що нахилилася над судиною, бачить зображення свого ока в дзеркалі на відстані найкращого зору $d = 25$ см, коли відстань від ока до поверхні води $h = 5$ см. Визначите глибину H судини.

84. Перетин скляної прямої призми має форму рівнобедреного трикутника. Одна з рівних граней призми посріблена. Промінь світла падає

на другу рівну грань призми перпендикулярно до її поверхні і після двох віддзеркалень виходить через третю грань призми перпендикулярно до неї. Знайдіть кути призми. Призма знаходиться в повітрі.

85. Промінь світла виходить з призми під тим же кутом, під яким входить в неї, причому відхиляється від первинного напрямку розповсюдження на кут $\theta = 15^\circ$. Заломлюючий кут призми рівний $\varphi = 45^\circ$. Знайдіть показник заломлення n матеріалу призми. Призма знаходиться в повітрі.

86. Промінь світла падає з повітря на бічну грань прямої призми, заломлюючий кут якої $\varphi = 60^\circ$. Кут падіння променя $\alpha = 30^\circ$. Визначте кут δ відхилення променя від первинного напрямку після проходження променя через призму. Показник заломлення матеріалу призми $n = 1,5$.

87. Промінь світла падає на бічну грань скляної призми під прямим кутом. Визначте кут δ відхилення променя від первинного напрямку, якщо заломлюючий кут призми рівний: 1) $\varphi_1 = 30^\circ$; 2) $\varphi_2 = 60^\circ$.

88. Пряма призма виготовлена з матеріалу з показником заломлення n . В основі призми лежить рівнобедрений прямокутний трикутник ABC . Одна з рівних бічних граней (ABB_1A_1) - матова, дві інші - гладкі. Призма стоїть на газеті, стикаючись з нею більшою з бічних граней (ACC_1A_1). Яку частину η площі газетного тексту, закритого призмою, може бачити спостерігач, що дивиться через гладку грань BCC_1B_1 ?

89. Для звернення зображення часто використовують призму Дове (див. рис.38), що є усіченою прямою прямокутною рівнобедреною призмою. Визначте мінімальну довжину a ребра AB , при якій пучок світла, що цілком заповнює бічну грань призми, повністю пройде через призму. Висота трапеції $ADCB$ рівна $h = 2,1$ см. Показник заломлення матеріалу призми $n = 1,41$.

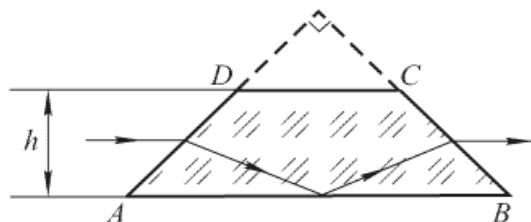


Рис.38

90. Світло падає під кутом α на торцеву поверхню конічного світлопровода, що звужується, з кутом розчину конуса $\varphi \ll 1$. Показник заломлення матеріалу світлопровода n , діаметр вхідного торця D . Знайдіть довжину L , на яку промінь проникає всередину світлопровода, якщо його

бічна поверхня: а) дзеркальна; б) прозора. Поглинанням світла в світлопроводі нехтувати.

91. Завдяки заломленню і віддзеркаленню сонячних променів в краплях дощу або туману виникає веселка. Визначите кут δ відхилення світлового променя, падаючого на сферичну краплю води, в результаті двох заломлень і одного віддзеркалення на поверхні краплі. Кут падіння світла з повітря на поверхню краплі рівний α .

92. Людина дивиться на рибу, що знаходиться в діаметрально протилежній від нього точці сферичного акваріума радіусу R . На яку відстань x зміщене при цьому зображення риби щодо самої риби? Показник заломлення води прийняти рівним $n = 4/3$.

93. Плоскоопукла лінза з фокусною відстанню $F_1 = 10$ см занурена плоскою поверхнею у воду так, що сферична поверхня лінзи знаходиться в повітрі. Перпендикулярно до поверхні води падають паралельні промені світла. На якій відстані F_1 від плоскої поверхні лінзи фокусуються світлові промені? Показник заломлення води $n = 1,33$.

94. Фотограф з човна знімає морську зірку, лежачу на дні (глибина $H = 2$ м) прямо під ним. У скільки разів зображення на плівці буде менше предмету, якщо фокусна відстань об'єктиву $F_1 = 10$ см, а відстань від об'єктиву до поверхні води $L = 50$ см? Показник заломлення води $n = 1,33$.

95. Плоску поверхню плоскоопуклої лінзи, фокусна відстань якої рівна F_0 , посріблили. Визначите фокусну відстань F системи, що вийшла, світло на яку падає з боку скла.

96. Увігнуте дзеркало з радіусом кривизни $R = 40$ см наповнено водою (показник заломлення води $n = 4/3$). Визначите фокусну відстань F цієї системи і її оптичну силу D .

97. Якщо у плоскоопуклої лінзи посріблити плоску поверхню, її оптична сила стане рівною $D_1 = 4$ дптр, а якщо посріблити сферичну поверхню, оптична сила збільшується до $D_2 = 9$ дптр. Який показник заломлення n скла лінзи?

98. Опукло-увігнута лінза має радіуси кривизни $R_1 = R$ і $R_2 = 3R$ відповідно. Коли увігнуту поверхню посріблили, оптична сила лінзи стала рівною нулю. Визначите показник заломлення n скла, з якого виготовлена лінза.

99. Плоска поверхня плоскоопуклої лінзи з фокусною відстанню F посріблена. На відстані d від лінзи з боку опуклої поверхні розташовано точкове джерело світла. На якій відстані f від лінзи розташовано зображення джерела?

100. З плоскопаралельної скляної пластинки виготовлено три лінзи (див. рис.39). Фокусна відстань лінз 1 і 2, складених разом, рівне F' , фокусна відстань складених разом лінз 2 і 3 рівне F'' . Визначте фокусну відстань F кожної лінзи.

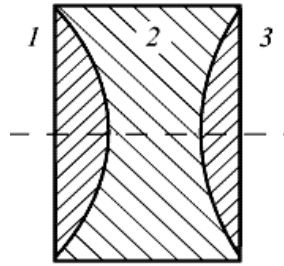


Рис.39

101. Свічка знаходиться на відстані $d = 15$ см перед збираючою лінзою з фокусною відстанню $F = 30$ див. Плоске дзеркало розташоване на відстані $b = 15$ см за лінзою. На якій відстані a від лінзи знаходиться зображення свічки, що створюється системою?

102. Джерело світла розташоване на подвійній фокусній відстані від збираючої лінзи. За лінзою перпендикулярно головній оптичній осі поміщено плоске дзеркало. На якій відстані a від лінзи потрібно помістити дзеркало, щоб промені, відбиті від дзеркала, після вторинного проходження через лінзу стали паралельними?

103. За тонкою збираючою лінзою перпендикулярно її головній оптичній осі розташовано плоске дзеркало. На лінзу під кутом α на відстані h від головної оптичної осі падає вузький промінь світла. Заломившись в лінзі і відбившись від дзеркала, він виходить з лінзи паралельно первинному напрямку, але зміщеним на відстань L (див. рис. 40). Визначте фокусну відстань F лінзи.

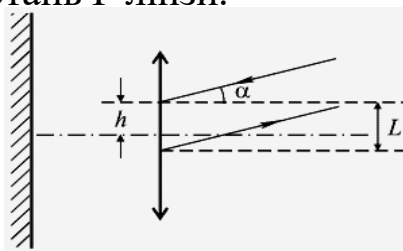


Рис.40

104. Два плоскі дзеркала утворюють двогранний кут, рівний $\pi/2$. У кут вставлена збираюча лінза з фокусною відстанню F так, що її головна оптична вісь складає кут $\pi/4$ з кожним дзеркалом (див. рис.41). Радіус лінзи $r = F$. На головній оптичній осі лінзи на відстані $d = 3F/2$ від неї розташовано джерело світла S . На якій відстані f від лінзи розташовано зображення джерела світла, що знаходиться на головній оптичній осі?

105. На яких відстанях f від лінзи знаходяться зображення точкового джерела, що створюються системою, що складається із збираючої лінзи з фокусною відстанню F і конічного дзеркала з кутом $\varphi/2$ при вершині (див. рис. 42)? Вісь конуса співпадає з віссю лінзи. Відстань між вершиною конуса і лінзою рівне $2F$. Відстань між джерелом і лінзою $d = 3F/2$.

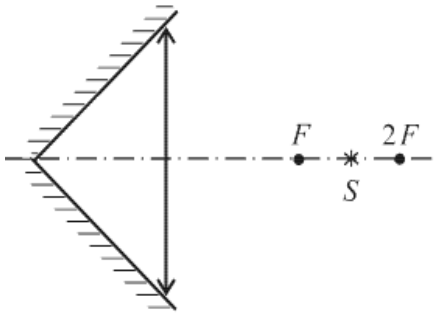


Рис. 41

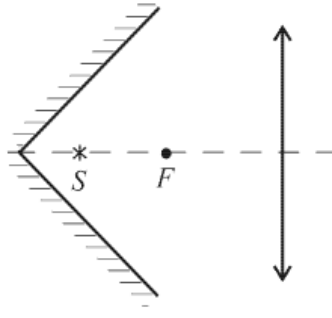


Рис. 42

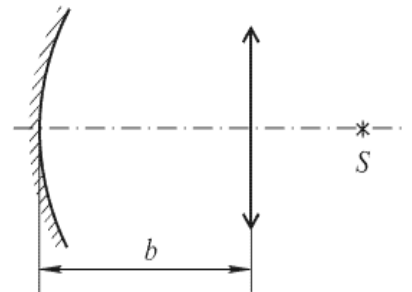


Рис. 43

106. Оптична система складається із збираючої лінзи з фокусною відстанню F і увігнутого дзеркала радіусу R , розташованих на відстані b один від одного так, що їх головні оптичні осі співпадають (див. рис.43). На головній оптичній осі лінзи знаходиться точкове джерело світла S . На якій відстані d від лінзи повинне знаходитися джерело S , щоб його зображення співпало з ним самим?

107. Паралельний пучок світла падає на збираючу лінзу, а потім на увігнуте дзеркало з фокусною відстанню $F_2 = 24$ см. Відстань між лінзою і дзеркалом $b = 32$ см. Якою повинна бути фокусна відстань F_1 лінзи, щоб світло, відбившись від дзеркала, зібралось в крапці, віддаленій від дзеркала на відстань $f = 6$ см?

108. Точкове джерело світла знаходиться на відстані $d = 10$ см від збираючої лінзи з фокусною відстанню $F = 12$ см на її головній оптичній осі. Промені, заломившись в лінзі, падають на опукле дзеркало, розташоване на відстані $b = 3$ см за лінзою (див. Рис.44). Відбиті від дзеркала промені, знов пройшовши через лінзу, йдуть пучком, паралельним головній оптичній осі. Визначите радіус кривизни R дзеркала.

109. Оптична система складається із збираючої лінзи з фокусною відстанню F і дзеркальної кульки радіусу R , центр якої знаходиться на оптичній осі лінзи на відстані b від неї (див. Рис.45). На якій відстані d від лінзи знаходиться точкове джерело S , розташоване на оптичній осі системи, якщо зображення джерела співпадає з самим джерелом?

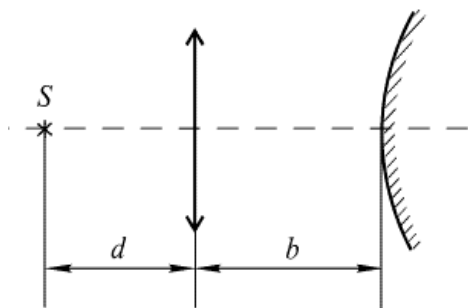


Рис. 44

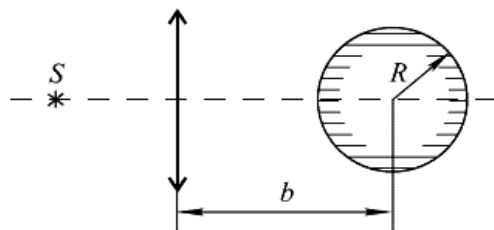


Рис.45

110. Розсіююча лінза і увігнуте дзеркало розташовані так, що пучок променів, паралельних головній оптичній осі, пройшовши лінзу, відбившись від дзеркала і ще раз пройшовши лінзу, залишається паралельним тій же осі. Фокусні відстані лінзи і дзеркала рівні $F_1 = 12$ см і $F_2 = 36$ см відповідно. Де і яке вийде зображення, якщо джерело помістити в оптичному центрі дзеркала?

111. Дві збираючі лінзи з фокусними відстанями $F_1 = 20$ см і $F_2 = 40$ см розташовано на відстані $b = 1,5$ м одна від одної. Предмет висотою $H_0 = 2$ см знаходиться на відстані $d_1 = 25$ см від першої лінзи. На якій відстані f_2 від другої лінзи вийде зображення предмету і яка його висота H ?

112. Оптична система складається з двох збираючих лінз з фокусними відстанями $F_1 = 20$ см і $F_2 = 10$ см. Відстань між лінзами $b = 30$ см. Предмет знаходиться на відстані $d_1 = 30$ см від першої лінзи на оптичній осі системи. На якій відстані f_2 від другої лінзи вийде зображення предмету?

113. Дві однакові збираючі лінзи з фокусною відстанню F кожна розташована так, що їх головні оптичні осі утворюють кут α , і головна оптична вісь другої лінзи проходить через оптичний центр першої (див. Рис.46). У фокусі першої лінзи розташовано точкове джерело світла S . Відстань між центрами лінз $2F$. Знайдіть відстань між джерелом S і його зображенням F' в даній системі.

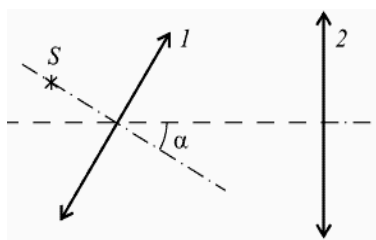


Рис.46

114. Дві збираючі лінзи з однаковими фокусними відстанями F зміщено щодо один одного на відстань F (див. Рис.47). Оптична вісь першої лінзи паралельна оптичній осі другої лінзи і знаходиться на відстані h від неї. Точкове джерело світла S розташоване на відстані $2F$ від першої лінзи на її

головній оптичній осі. Знайдіть відстань між джерелом S і його зображенням S' .

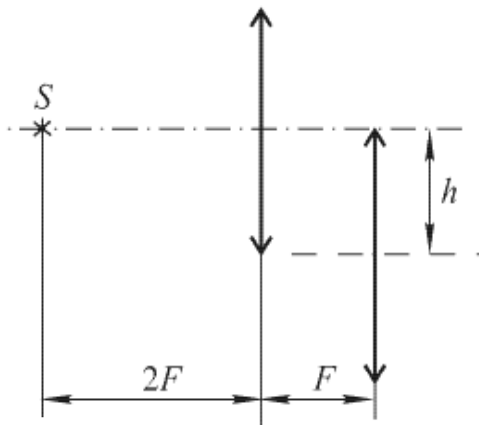


Рис.47

115. На якій відстані b потрібно розташувати збираючу і розсіюючу лінзи з фокусними відстанями $F_1 = 10$ см і $F_2 = -6$ см, щоб паралельний пучок променів, пройшовши крізь них, залишився паралельним?

116. Збираюча і розсіююча лінзи з фокусними відстанями $F_1 = 30$ см і $F_2 = -10$ см розташовані на відстані $b = 20$ см одна від одної. На збираючу лінзу падає паралельний пучок променів діаметру $D_1 = 12$ мм. Який діаметр D_2 пучка на відстані $a = 20$ см за розсіюючою лінзою?

117. Паралельний пучок світла падає на систему з трьох тонких лінз із загальною оптичною віссю. Фокусні відстані лінз відповідно рівні $F_1 = 10$ см, $F_2 = -20$ і $F_3 = 9$ см. Відстань між першою і другою лінзами $a_1 = 15$ см, між другою і третьою $a_2 = 5$ см. Визначите положення точки сходження пучка після виходу з системи лінз.

118. Відстань якнайкращого зору далекозорої людини $d_1 = 67$ см. Визначите оптичну силу D окулярів, що дозволяють цій людині читати книгу на відстані якнайкращого зору нормального ока $d_0 = 25$ см.

119. Межі акомодції у короткозорої людини $d_1 = 10$ см і $d_2 = 25$ см. В межах яких відстаней L чоловік може чітко бачити предмети, якщо він надіне окуляри з оптичною силою $D = -4$ дптр?

120. На яку величину ΔD зміниться оптична сила кришталика ока за рахунок його акомодції при переведенні погляду із зірки на книгу, що знаходиться на відстані якнайкращого зору $d_0 = 25$ см?

СПИСОК ВИКОРИСТНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Загальна фізика. Оптика : оглядові лекції / уклад. В. М. Кадченко. Кривий Ріг : КДПУ, 2020. 70 с. URL: http://elibrary.kdpu.edu.ua/bitstream/123456789/4159/1/ДЕК_ОГЛЯДОВІ%20ЛЕКЦІЇ_2.pdf
2. Коваленко В. Ф. Загальна фізика в прикладах, запитаннях і відповідях. Механіка : навчальний посібник. Київ : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2011. 223 с. URL: http://rex.knu.ua/wp/wp-content/uploads/2017/10/Kovalenko_Mechanics.pdf
3. Конспект з фізики для студентів скороченої форми навчання / уклад. О. Крамар. Тернопіль : Центр оперативної поліграфії, 2018. 128 с. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/27376/1/metod_AT_preprint.pdf
4. Коцюбинський В. О., Бойчук В. М. Фізика (вибрані питання) : курс лекцій. Івано-Франківськ :ДВНЗ "Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника", 2021. 309 с. URL: <http://lib.pnu.edu.ua:8080/bitstream/123456789/9429/1/Фізика%20вибрані%20питання%29.pdf>
5. Коцюбинський В. О., Бойчук В. М. Фізика : курс лекцій. Івано-Франківськ :ДВНЗ "Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника", 2020. 310 с. URL: http://lib.pnu.edu.ua:8080/bitstream/123456789/6649/1/Курс%20лекцій_фізика.pdf
6. Лекції з курсу загальної фізики . Розділ I. Механіка / уклад. М. І. Правда. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 55 с. URL: http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/7495/1/MV_Pravda.pdf
7. Лекції з курсу загальної фізики. Розділ IV. Хвильова оптика / уклад. М. І. Правда. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 20 с. URL: http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/7498/1/MV_Pravda.pdf
8. Лекції з курсу загальної фізики. Розділ II. Молекулярна фізика та термодинаміка / уклад. М. І. Правда. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 36 с. URL: http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/7496/1/MV_Pravda.pdf
9. Лекції з курсу загальної фізики. Розділ III. Електрика та магнетизм / уклад. М. І. Правда. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 56 с. URL: http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/7497/1/MV_Pravda.pdf
10. Огородніков В. А., Федотов В. О., Перлов В. Є. Теоретична механіка. Кінематика : конспект лекцій. Вінниця : ВНТУ, 2015. 69 с. URL: https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/18337/TM_kin_kl.PDF?sequence=1
11. Огородніков В. А., Федотов В. О., Кириця І. Ю. Теоретична механіка. Динаміка : конспект лекцій. Вінниця : ВНТУ, 2016. 84 с. URL: https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/18336/Конспект_лекцій_Динаміка_Кириця.PDF?sequence=1&isAllowed=y
12. Павло В. Фізика. Основи і механічний рух : підручник. Одеса : Book Chef, 2020. 384 с.
13. Прокопів В. В. Конспекти лекцій з молекулярної фізики. Івано-Франківськ : Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2017. 76 с. URL: http://lib.pnu.edu.ua:8080/bitstream/123456789/3745/1/Konspekt-FF_Knyga.pdf
14. Русаков В. Ф. Фізичні основи механіки: навчальний посібник. Вінниця: ДонНУ

- імені Василя Стуса, 2019. 144 с. URL: https://r.donnu.edu.ua/bitstream/123456789/113/1/84_%20Русаков%20В.Ф.%20Механіка.pdf
15. Янг Г., Фрідман Р., Сендін Т., Форд Л. Фізика для університетів з розділами сучасної фізики. Львів : Наутілус, 2009. 1600 с.
16. Calculation of Optimal Geometric Parameters Electrical Apparatus for Controlling the Irrigation System / O. Sadovoy et al. 2023 *IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 27–30 September 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/mees61502.2023.10402456>
17. Comparison of Active Power Losses of Single-Phase Electromagnetic Static Devices by Radial Electromagnetic System / O. Sadovoy et al. 2022 *IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 20–23 October 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/mees58014.2022.10005760>
18. Technological Parameters Of The Magnetic Circuit Of The Compact Transformer For Aggregate Electric Drive / E. Avdieieva et al. 2020 *IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-4, DOI: <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240779>.
19. Development of a Model of Cell Functioning to Measure the Interaction of Low-Energy EMF / M. Kundenko et al. 2022 *XXXII International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)*, Sozopol, Bulgaria, 7–11 September 2022. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/mma55579.2022.9993093>.

Навчальне видання

ФІЗИКА.

Модулі 6,7 «Хвильова оптика. Квантова природа світла»

Методичні рекомендації

Укладачі: **Вахоніна** Лариса Володимирівна

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 4,9.

Тираж 20 прим. Зам. № _____

Надруковано у видавничому відділі
Миколаївського національного університету
54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4490 від 20.10.2013р.