

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ВИЩОЇ МАТЕМАТИКИ І ФІЗИКИ

Методичні рекомендації
щодо самостійної роботи з фізики
для студентів денної та заочної форм навчання
для технічних спеціальностей
Частина II

ПОКРОВСЬК, 2021

УДК 53(072)

М 54

Методичні рекомендації щодо самостійної роботи з фізики для студентів денної та заочної форм навчання для технічних спеціальностей. Частина II [Електронний ресурс] / уклад. Ю.А. Артеменко, М.М. Власенко. – Покровськ : ДонНТУ, 2021. – 124 с.

Методичні рекомендації складено у відповідності до навчальної програми дисципліни «Фізика», з викладанням курсу фізики на протязі двох семестрів. Рекомендації містять задачі, які мають бути розв'язані студентами в індивідуальних завданнях, а також можуть використовуватись для самостійної підготовки. У всіх розділах методичних рекомендацій наведені приклади розв'язання задач та зведення основних формул до розділу.

Методичні рекомендації призначені для допомоги студентам денної та заочної форм навчання та викладачам під час роботи над загальним курсом фізики.

Укладачі: Артеменко Ю. А., доц., к.т.н., доц. каф. Вищої математики і фізики

Власенко М. М, доц., к.т.н., доц. каф. Вищої математики і фізики

Рецензент: Гоголева Н.Ф., доц., к.ф.-м.н., доц. каф. Вищої математики і фізики

Відповідальний за випуск: Медведєва М. І., зав. каф. Вищої математики і фізики

Затверджено навчально-методичним відділом ДонНТУ,

протокол № 9 від « 25 » травня 2021 р.

Розглянуто на засіданні каф. ВМФ, протокол № 5 від « 18.05 » ____ 2021 р.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ	5
1.1. Витяг з базової робочої програми курсу загальної фізики	5
1.2. Правила оформлення індивідуального завдання	6
1.3. Методичні вказівки до розв’язання задач	8
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНІ МАТЕРІАЛИ	10
2.1. Коливання і хвилі	10
2.2. Хвильова і квантова оптика	17
2.3. Елементи квантової механіки. Будова атому	26
2.4. Будова атомних ядер. Радіоактивність	39
РОЗДІЛ 3. ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ	43
3.1. Приклади розв’язання задач	43
3.2. Таблиця варіантів індивідуального завдання	89
3.3. Задачі для індивідуального завдання	90
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	117
ДОДАТОК А	118
ДОДАТОК Б	119

ВСТУП

Метою викладання курсу загальної фізики є формування у фахівців різних технічних спеціальностей сучасного фізичного світогляду, на якому базуються інженерно-технічні науки, ознайомлення студентів з фундаментальними фізичними законами і явищами, що лежать в основі сучасних технологій, розвиток навичок самостійної роботи.

Курс фізики складається з лекцій, практичних і лабораторних занять і самостійної роботи студентів. Самостійна робота студентів, яка є однією з найважливіших моментів освоєння курсу, містить у собі вивчення розділів фізики з використанням основної й додаткової літератури.

У вивченні курсу фізики розв'язання задач має винятково велике значення. Розв'язання задач і аналіз отриманих результатів сприяють засвоєнню і більш глибокому розумінню основних законів фізики, формують навички у застосуванні загальних законів матеріального світу для розв'язання конкретних питань, які торкаються практичних аспектів різних галузей виробництва. Уміння вирішувати завдання є кращим критерієм оцінки глибини вивчення програмного матеріалу і його засвоєння.

Мета даних методичних рекомендацій - допомогти студентам денної і заочної форм навчання більш ефективно засвоїти матеріал курсу фізики. Методичні рекомендації містять виписку з робочої програми дисципліни «Фізика» ч. II, скорочений теоретичний матеріал і зведення основних формул, приклади розв'язання типових задач з усіх розділів фізики, а також варіанти завдань для індивідуальних робіт.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

1.1. Витяг з базової робочої програми курсу загальної фізики

Коливання і хвилі

Коливання у природі і техніці. Гармонічні коливання. Маятники. Електричний коливальний контур. Векторна діаграма. Додавання коливань одного напрямку. Биття. Додавання взаємно перпендикулярних коливань. Згасаючі коливання. Вимушені коливання.

Хвилі в пружному середовищі. Рівняння біжучої хвилі. Хвильове рівняння. Фазова швидкість пружних хвиль у твердому середовищі. Енергія пружної хвилі. Стоячі хвилі. Хвильовий пакет. Групова швидкість.

Електромагнітні хвилі. Енергія та імпульс електромагнітної хвилі.

Хвильова оптика

Розвиток уявлень про природу світла. Інтерференція світла. Когерентність. Інтерференційна картина від двох джерел. Інтерференція світла в тонких плівках. Просвітлена оптика. Багатопроменева інтерференція. Інтерферометри.

Дифракція світла. Принцип Гюйгенса-Френеля. Метод зон Френеля. Дифракція Френеля на найпростіших перешкодах та на отворах. Дифракція Фраунгофера на щілині. Дифракційні ґрати. Роздільна здатність оптичних приладів. Дифракція на просторових структурах. Поняття про голографію.

Поляризація світла. Природне і поляризоване світло. Поляризація світла при подвійному променезаломленні. Штучна оптична анізотропія. Поширення світла в речовині.

Квантова природа випромінювання

Теплове випромінювання. Основні визначення. Закони Кірхгофа. Закон Стефана-Больцмана і закон Віна. Формула Планка. Оптична пірометрія.

Фотони. Зовнішній фотоефект. Ефект Комптона.

Елементи атомної фізики і квантової механіки

Хвильові властивості мікрочастинок. Гіпотеза де Бройля. Співвідношення невизначеностей. Хвильова функція. Рівняння Шредингера. Квантування фізичних величин. Проходження частинок крізь потенційний бар'єр.

Фізика атомів і молекул. Досліди Резерфорда. Теорія Бора. Атом водню. Принцип Паулі. Енергія молекул.

Випромінювання і спектри. Спектри атомів і молекул. Рентгенівські спектри. Вимушене випромінювання. Лазери.

Елементи фізики атомного ядра

Склад і характеристики атомного ядра. Дефект маси та енергія зв'язку ядра. Ядерні сили. Радіоактивність. Ядерні реакції. Поділ ядер. Синтез атомних ядер.

1.2. Правила оформлення індивідуального завдання

1. Номери задач, які студент повинен включити в своє індивідуальне завдання, визначаються з таблиці варіантів. Номер варіанта відповідає номеру студента у списку групи (узгоджується з викладачем).
2. Індивідуальні завдання потрібно виконувати в окремому зошиті, обкладинка якого оформлюється за зразком, наведеному у Додатку А.
3. Умови задач в контрольній роботі треба переписати повністю без скорочень. Після цього записати їх короткі умови та перевести всі дані, що задані в умовах, у систему СІ.
4. Розв'язувати задачі потрібно в загальному вигляді, тобто виразити шукану величину в вигляді формули. При такому способі розв'язання не проводяться обчислення проміжних величин.
5. Розв'язання задач слід супроводжувати короткими, але вичерпними поясненнями; у тих випадках, коли це необхідно, додати креслення або

навести рисунки. Рисунки та креслення виконуються за допомогою креслярського приладдя.

6. Після отримання розрахункової формули для перевірки правильності її слід підставити в праву частину формули замість символів величин позначення одиниць цих величин, провести з ними необхідні дії і переконатися в тому, що одержана при цьому одиниця відповідає шуканій величині. Якщо такої відповідності немає, то це означає, що задача розв'язана неправильно.
7. Числові значення величин при підстановці їх в розрахункову формулу слід виражати тільки в одиницях СІ. Як виняток допускається виражати числові значення однорідних величин, що стоять в чисельнику і знаменнику дроби і мають однакові ступені в будь-яких, але однакових одиницях.
8. При підстановці в розрахункову формулу, а також при записі відповіді числові значення величин слід записувати як добуток десяткового дроби з однією значущою цифрою перед комою на відповідний ступінь десяти. Наприклад, замість 76400 треба записати $7,64 \cdot 10^4$, замість 0,00329 записати $3,29 \cdot 10^{-3}$ і т. д.
9. Обчислення за розрахунковою формулою необхідно проводити з дотриманням правил наближених обчислень. Як правило, остаточну відповідь слід записувати з трьома значущими цифрами. Це стосується і до випадку, коли результат отриманий із застосуванням калькулятора.
10. У кінці контрольної роботи слід зазначити, яким підручником або навчальним посібником студент користувався при вивченні курсу фізики (назва підручника, автор, рік видання). Це робиться для того, щоб рецензент у разі потреби міг вказати, який матеріал необхідно вивчити студенту для завершення контрольної роботи.

11. Якщо індивідуальна робота не зарахована, то студент повинен виконати виправлення в тому ж зошиті й представити її на повторну перевірку.

1.3. Методичні вказівки до розв'язання задач

Перш ніж приступитися до розв'язання задач якогось розділу, необхідно проробити теорію цього розділу. Без знання теорії не можна розраховувати на успішне розв'язання навіть простих задач. При розв'язанні більшості фізичних задач розрахункового характеру можна виділити чотири основні етапи:

- 1) аналіз умови задачі, у якому необхідно дати схему або креслення, що пояснює її зміст (у тих випадках, коли це можливо);
- 2) складання рівнянь, які зв'язують фізичні величини, що характеризують розглянуте явище з кількісної сторони;
- 3) розв'язання отриманих рівнянь відносно тієї або іншої величини, що вважається в даній задачі невідомою;
- 4) чисельний розрахунок і аналіз отриманого результату.

Рекомендуємо Вам при розв'язанні задач дотримуватися наступної послідовності дій.

1. Повністю запишіть умови задачі.
2. Зробіть короткий запис умови з приведенням всіх даних в одиницях СІ.
3. Виконайте схематичне креслення (якщо це необхідно), що відбиває умови задачі й ідею її розв'язання.
4. Запишіть формули, що виражають фізичні закони, застосування яких необхідно для розв'язання задачі обраним способом. Супроводжуйте розв'язання задачі короткими, але вичерпними поясненнями. У результаті вийде одне або кілька рівнянь, що включають у себе як задані, так і невідомі величини.

5. Перш ніж вирішувати складену систему рівнянь, переконайтесь у тому, що кількість невідомих дорівнює кількості рівнянь, інакше система не буде мати певного розв'язання.

Як правило, розв'язувати задачу слід у загальному виді, тобто треба виразити шукану величину в буквених позначеннях величин, заданих в умові задачі й узятих з таблиць. Одержавши відповідь у вигляді алгебраїчної формули або рівняння, перевірте, чи дає отримана формула одиницю виміру шуканої величини. Якщо при перевірці одиниця виміру шуканої величини не виходить, то це означає, що в розв'язанні допущена помилка. Переконавшись в правильності розмірності шуканої величини, потрібно підставити в кінцеву формулу числові дані, виражені в одиницях однієї системи.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНІ МАТЕРІАЛИ

2.1 Коливання і хвилі

Механічні коливання.

1. Рівняння гармонічних коливань

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi),$$

де x – зсув точки, що коливається, відносно положення рівноваги; t – час; A , ω , φ – відповідно амплітуда, циклічна частота, початкова фаза коливань; $(\omega t + \varphi)$ – фаза коливань у момент часу t .

2. Циклічна частота коливань

$$\omega = 2\pi\nu, \text{ або } \omega = \frac{2\pi}{T},$$

де ν і T – частота і період коливань.

3. Швидкість точки, що здійснює гармонічні коливання

$$v = -\omega A \sin(\omega t + \varphi).$$

4. Прискорення при гармонічному коливанні

$$a = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi).$$

5. Диференціальне рівняння гармонічних коливань матеріальної точки

$$m\ddot{x} = -kx, \text{ або } \ddot{x} + \omega^2 x = 0,$$

де m - маса точки; k - коефіцієнт квазіпружної сили ($k = m\omega^2$).

6. Повна енергія матеріальної точки, яка здійснює гармонічні коливання,

$$E = \frac{mA^2\omega^2}{2} = \frac{kA^2}{2}.$$

7. Період коливань тіла, підвішеного на пружині (пружинний маятник),

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}},$$

де m - маса тіла; k - жорсткість пружини.

Формула є справедливою для пружних коливань в умовах, коли виконується закон Гука (при малій масі пружини порівняно з масою тіла).

Період малих коливань математичного маятника

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

де l - довжина маятника; g - прискорення вільного падіння.

Період малих коливань фізичного маятника

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mgd}},$$

де J - момент інерції тіла, що коливається, відносно осі коливань; d - відстань центра мас маятника від осі коливань; $L = \frac{J}{md}$ - приведена довжина фізичного маятника.

Наведені формули є точними для випадку нескінченно малих амплітуд.

Для скінченних амплітуд ці формули дають лише наближені результати. Для кутів відхилення не більше $\sim 3^\circ$ похибка в значенні періоду не перевищує 1%.

Період крутильних коливань тіла, підвішеного на пружній нитці,

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{k}},$$

де J - момент інерції тіла відносно осі, яка збігається з пружною ниткою; k - жорсткість пружної нитки, яка дорівнює відношенню пружного моменту, що виникає при закрученні нитки, до кута, на який нитка закручується.

Додавання коливань. Згасаючі коливання.

8. Амплітуда результуючого коливання, отриманого при додаванні двох коливань з однаковими частотами, що відбуваються в одному напрямку, визначається за формулою

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 \cdot A_2 \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_1)},$$

де A_1 і A_2 - амплітуди складових коливань.

Початкову фазу φ результуючого коливання можна знайти із формули

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}.$$

9. Частота биття, що виникає при додаванні двох коливань, які відбуваються в одному напрямку з різними, але близькими за значенням частотами ν_1 і ν_2 ,

$$\nu = \nu_1 - \nu_2.$$

10. Рівняння траєкторії точки, яка бере участь у двох взаємно перпендикулярних коливаннях з амплітудами A_1 і A_2 і початковими фазами φ_1 і φ_2 ,

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - 2xy \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1).$$

Якщо початкові фази φ_1 і φ_2 складових коливань однакові, тобто їх різниця фаз $\Delta\varphi = 0$, результуючий рух точки відбувається по прямій, що проходить через початок координат

$$y = \frac{A_2}{A_1} x.$$

Якщо різниця фаз коливань $\Delta\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$, рівняння траєкторії набуває вигляду

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} = 1,$$

тобто точка рухається по еліпсу, зведеному до координатних осей, у напрямі за годинниковою стрілкою або проти неї. Якщо $A_1 = A_2$, еліпс вироджується в коло.

11. Диференціальне рівняння загасаючих коливань

$$m\ddot{x} = -kx - r\dot{x}, \text{ або } \ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = 0,$$

де r - коефіцієнт опору; β - коефіцієнт загасання $\left(\beta = \frac{r}{2m}\right)$; ω_0 - власна циклічна частота коливань $\left(\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}\right)$.

12. Рівняння згасаючих коливань (розв'язання диференціального рівняння)

$$x(t) = A(t) \cdot \cos(\omega t + \varphi).$$

де $A(t)$ - амплітуда згасаючих коливань в момент t ; ω - їх циклічна частота.

13. Циклічна частота згасаючих коливань

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}.$$

14. Залежність амплітуди згасаючих коливань від часу

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\beta t},$$

де A_0 - амплітуда коливань у момент $t = 0$.

15. Логарифмічний декремент загасання

$$\lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta T,$$

де $A(t)$ і $A(t+T)$ - амплітуди двох послідовних коливань, віддалених за часом одне від одного на період.

16. Диференціальне рівняння вимушених коливань

$$m\ddot{x} = -kx - r\dot{x} + F_0 \cos \Omega t, \text{ або } \ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = f_0 \cos \Omega t,$$

де $F_0 \cos \Omega t$ - зовнішня періодична сила, яка діє на матеріальну точку, що коливається, і викликає вимушені коливання; F_0 - її амплітудне значення;

$$f_0 = \frac{F_0}{m}.$$

17. Амплітуда вимушених коливань

$$A = \frac{f_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2 \Omega^2}}.$$

18. Резонансна частота і резонансна амплітуда

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} \text{ і } A_{\text{рез}} = \frac{f_0}{2\beta\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}.$$

Хвилі.

19. Рівняння плоскої хвилі

$$\xi(x, t) = A \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \text{ або } \xi(x, t) = A \cos(\omega t - kx),$$

де $\xi(x, t)$ - зміщення точок середовища з координатою x в момент t ; ω - циклічна частота; v - швидкість поширення коливань в середовищі (фазова швидкість); k - хвильове число $\left(k = \frac{2\pi}{\lambda}, \lambda - \text{довжина хвилі} \right)$.

20. Довжина хвилі пов'язана з періодом T і частотою ν співвідношеннями

$$\lambda = vT \text{ і } \lambda = \frac{v}{\nu}.$$

21. Різниця фаз коливань двох точок середовища, відстань між якими (різниця ходу) дорівнює Δx ,

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x,$$

де λ - довжина хвилі.

22. Рівняння стоячої хвилі

$$\xi(x,t) = A \cos \omega \frac{x}{v} \cdot \cos \omega t \quad \text{або} \quad \xi(x,t) = A \cos kx \cdot \cos \omega t.$$

23. Фазова швидкість поздовжніх хвиль у пружному середовищі:

– у твердих тілах

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

де E - модуль Юнга; ρ - густина речовини;

– у газах

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}, \quad \text{або} \quad v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}},$$

де γ - показник адіабати ($\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ - відношення питомих теплоємностей

газу при сталих значеннях тиску та об'єму); R - газова стала; T - термодинамічна температура; M - молярна маса; P - тиск газу.

Електричні коливання і хвилі.

24. Формула Томсона. Період власних коливань у контурі без активного опору

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

де L – індуктивність контуру; C – його електроємність.

25. Зв'язок довжини електромагнітної хвилі з періодом T і частотою ν коливань:

$$\lambda = cT, \text{ або } \lambda = \frac{c}{\nu},$$

де c – швидкість електромагнітних хвиль у вакуумі ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с).

26. Швидкість електромагнітних хвиль у середовищі

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}},$$

де ϵ – діелектрична проникність; μ – магнітна проникність середовища.

2.2. Хвильова і квантова оптика

Інтерференція світла.

1. Швидкість світла в середовищі

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

де c – швидкість електромагнітних хвиль у вакуумі; n – абсолютний показник заломлення середовища.

2. Оптична довжина шляху світлової хвилі

$$L = nl,$$

де l – геометрична довжина шляху світлової хвилі в середовищі з показником заломлення n .

3. Оптична різниця ходу двох світлових хвиль

$$\Delta = L_1 - L_2.$$

4. Оптична різниця ходу світлових хвиль, які відбиті від верхньої та нижньої поверхонь тонкої плоскопаралельної пластинки або плівки, яка міститься в повітрі (рис. 2.1),

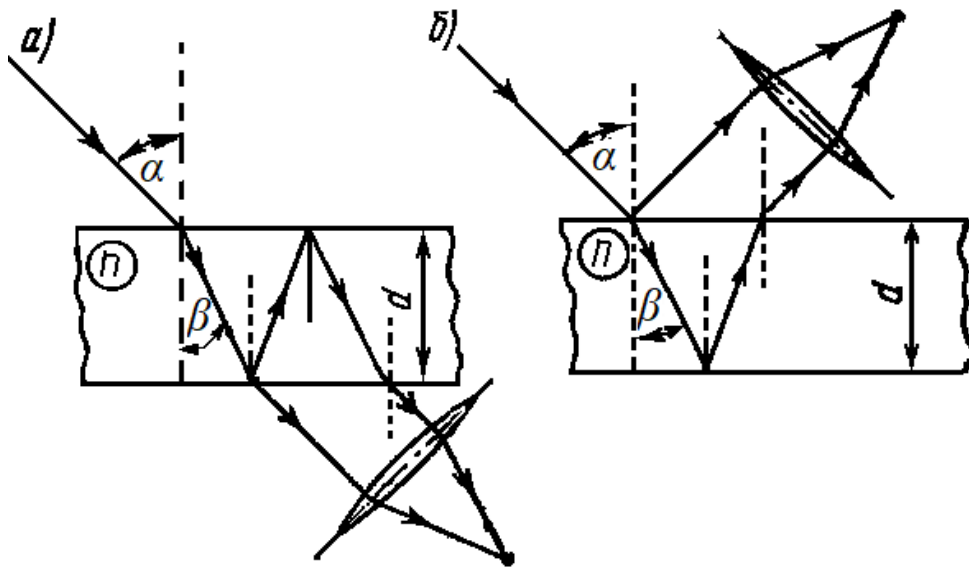


Рисунок 2.1-. Явище інтерференції в тонких плівках.

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} + \frac{\lambda}{2}, \text{ або } \Delta = 2dn \cdot \cos\beta + \frac{\lambda}{2},$$

де d – товщина пластинки (плівки); α – кут падіння; β – кут заломлення.

Другий доданок у цих формулах враховує зміну оптичної довжини шляху світлової хвилі на $\lambda/2$ при відбитті її від більш оптично щільного середовища.

Якщо відбиття відбувається від середовища з меншою оптичною густиною, то оптичний шлях хвилі не змінюється.

5. Зв'язок різниці фаз $\Delta\varphi$ коливань з оптичною різницею ходу світлових хвиль

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta.$$

6. Умова спостереження максимумів інтенсивності світла при інтерференції

$$\Delta = \pm m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

7. Умова спостереження мінімумів інтенсивності світла при інтерференції

$$\Delta = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

8. Радіуси світлих кілець Ньютона у відбитому світлі (або темних у світлі, що проходить)

$$r_m = \sqrt{(2m - 1) \frac{\lambda}{2} \cdot R},$$

де m – номер кільця ($m = 1, 2, 3, \dots$); R – радіус кривини поверхні лінзи, яка торкається плоскопаралельної скляної пластинки.

Радіуси темних кілець у відбитому світлі (або світлих у світлі, що проходить)

$$r_m = \sqrt{m\lambda R}.$$

Дифракція світла.

9. Радіус k -ї зони Френеля:

- для сферичної хвилі $\rho_k = \sqrt{\frac{ab}{a+b}} k\lambda$,

де a – відстань діафрагми з круглим отвором від точкового джерела світла; b – відстань діафрагми від екрана, на якому ведеться спостереження дифракційної картини; k – номер зони Френеля; λ – довжина хвилі;

- для плоскої хвилі $\rho_k = \sqrt{bk\lambda}$.

10. Дифракція світла на одній щілині при нормальному падінні променів. Умова спостереження мінімумів інтенсивності світла

$$a \cdot \sin \varphi = \pm 2k \frac{\lambda}{2} = \pm k\lambda, \quad k = 1, 2, 3, \dots,$$

де a – ширина щілини; φ – кут дифракції; k – номер мінімуму; λ – довжина хвилі.

Умова спостереження максимумів інтенсивності світла

$$a \cdot \sin \varphi = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

11. Дифракція світла на дифракційних ґратах при нормальному падінні променів.

Умова спостереження головних максимумів інтенсивності світла

$$d \cdot \sin \varphi = \pm k \lambda, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots$$

де d – період (стала) ґрат; k – порядковий номер максимуму;

φ – кут між нормаллю до поверхні ґрат і напрямком дифрагованих хвиль.

12. Роздільна здатність дифракційних ґрат

$$R = \frac{\lambda}{\Delta \lambda} = kN,$$

де $\Delta \lambda$ – найменша різниця довжин хвиль двох сусідніх спектральних ліній (λ і $\lambda + \Delta \lambda$), при якій ці лінії можна побачити у спектрі, отриманому за допомогою цих ґрат окремо; N – кількість штрихів ґрат; k – порядковий номер дифракційного максимуму.

13. Кутова дисперсія дифракційних ґрат

$$D_{\varphi} = \frac{\delta \varphi}{\delta \lambda} = \frac{k}{d \cdot \cos \varphi},$$

лінійна дисперсія дифракційних ґрат

$$D_l = \frac{\delta l}{\delta \lambda}.$$

Для малих кутів дифракції

$$D_l \approx D_{\varphi} \approx f \frac{k}{d},$$

де f – головна фокусна відстань лінзи, що збирає на екрані хвилі, які дифрагують.

14. Формула Вульфа-Брегга

$$2d \cdot \sin \theta = k\lambda,$$

де d – відстань між атомними площинами кристала; θ - кут ковзання (кут між напрямом пучка паралельних рентгенівських променів, які падають на кристал, і гранню кристала), який визначає напрямок, в якому має місце дзеркальне відбиття випромінювання (дифракційний максимум).

Поляризація і дисперсія світла.

15. Закон Брюстера

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n_{21},$$

де α_B – кут падіння, при якому відбита світлова хвиля повністю поляризована; n_{21} – відносний показник заломлення.

16. Закон Малюса

$$I = I_0 \cdot \cos^2 \varphi,$$

де I – інтенсивність плоскополяризованого світла, яке пройшло крізь аналізатор; I_0 - інтенсивність плоскополяризованого світла, яке падає на аналізатор; φ – кут між напрямком коливань світлового вектора хвилі, яка падає на аналізатор, і площиною пропускання аналізатора.

17. Ступінь поляризації світла

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

де I_{max} і I_{min} – максимальна і мінімальна інтенсивності частково-поляризованого світла, яке пропускається аналізатором.

18. Кут повороту φ площини поляризації оптично активними речовинами визначається співвідношеннями:

- у твердих тілах $\varphi = \alpha d$,

де α – стала обертання; d – довжина шляху, який пройшло світло в оптично-активній речовині;

- у чистих рідинах $\varphi = [\alpha] \rho d$,

де $[\alpha]$ – питоме обертання; ρ – густина рідини;

- у розчинах $\varphi = [\alpha] C d$,

де C – масова концентрація оптично активної речовини в розчині.

Теплове випромінювання.

19. Закон Стефана-Больцмана

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda = \sigma T^4,$$

де $R_e = \frac{dE}{dS \cdot dt}$ – енергетична світність абсолютно чорного тіла; dE – енергія, що випромінюється тілом за час dt ; dS – його площа; $r_{\lambda,T}$ – випромінювальна здатність; λ – довжина хвилі випромінювання; T – термодинамічна температура; σ – стала Стефана-Больцмана [$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴)].

20. Енергетична світність сірого тіла

$$R_e = \alpha_T \cdot \sigma T^4,$$

де α_T – коефіцієнт чорноти (коефіцієнт поглинання) сірого тіла.

21. Закон зміщення Віна

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

де $\lambda_{\max}$ – довжина хвилі, на яку припадає максимум енергії випромінювання; b – стала закону зміщення Віна ($b = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$).

22. Формула Планка

$$r_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1},$$

де $r_{\lambda,T}$ – випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла; λ – довжина хвилі; c – швидкість світла у вакуумі; k – стала Больцмана; T – термодинамічна температура; h – стала Планка ($h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$).

23. Залежність максимальної випромінювальної здатності від температури

$$(r_{\lambda,T})_{\max} = CT^5,$$

де C – стала [$C = 1,30 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)$].

Фотони. Фотоефект і ефект Комптона.

24. Формула Ейнштейна в загальному випадку

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = A + \frac{mv_{\max}^2}{2},$$

де $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ - енергія фотона, який падає на поверхню металу; A – робота виходу електрона із металу; $\frac{mv_{max}^2}{2}$ – максимальна кінетична енергія фотоелектрона;

якщо енергія фотона значно більша за роботу виходу ($h\nu \gg A$), то

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{mv_{max}^2}{2}.$$

25. Максимальна кінетична енергія фотоелектрона в двох випадках (нерелятивістському і релятивістському) визначається різними формулами:

а) якщо фотоефект викликаний фотоном, який має відносно малу енергію ($h\nu < 5 \text{ кеВ}$), то

$$E_{max} = \frac{m_0 v_{max}^2}{2},$$

де m_0 – маса спокою електрона;

б) якщо фотоефект викликаний фотоном, який має велику енергію ($h\nu \gg 5 \text{ кеВ}$), то

$$E_{max} = (m - m_0)c^2, \text{ або } E_{max} = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right),$$

де $\beta = v_{max}/c$; m – маса релятивістського електрона.

26. Червона межа фотоефекту

$$\lambda_0 = \frac{hc}{A}, \text{ або } \nu_0 = \frac{A}{h},$$

де λ_0 – максимальна довжина хвилі випромінювання (ν_0 – мінімальна частота), при яких ще можливий фотоефект.

27. Енергія фотона

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}.$$

28. Маса та імпульс фотона виражаються такими формулами:

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h}{c\lambda} \text{ і } p = mc = \frac{h}{\lambda}$$

29. Зміна довжини хвилі $\Delta\lambda$ фотона при розсіянні його на електроні на кут θ

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta),$$

де m – маса електрона віддачі; λ і λ' – довжини падаючої та розсіяної хвиль.

30. Комптонівська довжина хвилі

$$\lambda_c = \frac{h}{mc}.$$

(При розсіянні фотона на електроні $\lambda_c = 2,436$ пм).

2.3. Елементи квантової механіки. Будова атому.

Елементи квантової механіки.

1. Фазова швидкість хвилі де Бройля

$$v = \frac{\omega}{k},$$

де ω - циклічна частота; $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число; λ - довжина хвилі.

Групова швидкість

$$u = \frac{d\omega}{dk}.$$

2. Співвідношення де Бройля

$$E = h\nu, \quad p = \frac{h}{\lambda},$$

де E – енергія частинки, що рухається; p – імпульс частинки.

3. Зв'язок між імпульсом p частинки, що рухається, та довжиною хвилі де Бройля λ для двох випадків:

а) у класичному наближенні ($v \ll c$; $p = m_0 v$):

$$\lambda = \frac{h}{m_0 v},$$

де m_0 – маса спокою частинки;

б) у релятивістському випадку (коли швидкість v порівнянна зі швидкістю c світла у вакуумі, $p = mv = m_0 v / \sqrt{1 - v^2/c^2}$):

$$\lambda = \frac{h}{m_0 v} \sqrt{1 - v^2/c^2}.$$

4. Зв'язок довжини хвилі де Бройля з кінетичною енергією E_k частинки:

а) у класичному наближенні $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0 E_k}}$,

б) у релятивістському випадку $\lambda = \frac{hc}{\sqrt{E_k(E_k + 2E_0)}}$, де E_0 – енергія

спокою частинки ($E_0 = m_0 c^2$).

5. Співвідношення невизначеностей:

а) для координати та проекції імпульсу частинки

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{2\pi},$$

де Δp_x – невизначеність проекції імпульсу частинки на вісь x ;

Δx – невизначеність її координати;

б) для енергії і часу

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq \frac{h}{2\pi},$$

де ΔE – невизначеність енергії даного квантового стану; Δt – час перебування системи в цьому стані.

6. Одновимірне часове рівняння Шредінгера

$$i\hbar \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \cdot \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x^2},$$

де i – уявна одиниця ($i = \sqrt{-1}$); $\hbar = h/2\pi$ – стала Планка; m – маса частинки; $\psi(x,t)$ – хвильова функція, яка описує стан частинки.

Хвильова функція, яка описує одновимірний рух вільної частинки,

$$\psi(x,t) = A \exp \frac{i}{\hbar} (px - Et),$$

де A - амплітуда хвилі де Бройля; p - імпульс частинки; E - повна енергія частинки.

Умова нормування хвильової функції

$$\int_0^{\infty} |\psi(x, t)|^2 dx = 1.$$

Одновимірне рівняння Шредінгера для стаціонарних станів

$$\frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U(x)) \psi(x) = 0,$$

де E - повна енергія частинки; $U(x)$ - потенціальна енергія; $\psi(x)$ - координатна (або амплітудна) частина хвильової функції,
або в операторній формі

$$\Delta \psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0,$$

де $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ - оператор Лапласа.

У випадку гармонічного осцилятора рівняння Шредінгера має вигляд

$$\Delta \psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left(E - \frac{m\omega^2 x^2}{2} \right) \psi = 0,$$

де m - маса частинки; $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ - власна частота класичного гармонічного осцилятора; k - коефіцієнт квазіпружної сили.

Для випадку тривимірної задачі рівняння Шредінгера має вигляд

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0.$$

При розв'язанні рівняння Шредінгера слід враховувати стандартні умови, яким повинна задовольняти хвильова функція: скінченність (у всьому просторі), однозначність, безперервність самої ψ - функції та її першої і другої похідних.

7. Ймовірність dW знайти частинку в інтервалі від x до $x+dx$ (в одновимірному випадку) визначається формулою

$$dW = |\psi(x)|^2 dx,$$

де $|\psi(x)|^2$ - густина ймовірності.

Ймовірність W знайти частинку в інтервалі від x_1 до x_2 знаходиться інтегруванням dW за зазначеними межами інтегрування

$$W = \int_{x_1}^{x_2} |\psi(x)|^2 dx.$$

8. Власне значення енергії E_n частинки, яка перебуває на n -му енергетичному рівні в нескінченно глибокій одновимірній прямокутній потенціальній ямі, визначається формулою

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} n^2 \quad (n=1,2,3,\dots),$$

де l – ширина потенціальної ями.

Власна хвильова функція, що відповідає цій енергії, має вигляд

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{\pi n}{l} x.$$

Власні значення енергії гармонічного осцилятора

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2} \right) h\nu,$$

де $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Енергія нульових коливань гармонічного осцилятора

$$E_0 = \frac{h\nu}{2}.$$

9. Коефіцієнт заломлення n_3 хвиль де Бройля на межі низького потенціального бар'єра нескінченної ширини (рис. 2.2):

$$n_3 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{k_2}{k_1},$$

де λ_1 і λ_2 – довжини хвиль де Бройля в областях I і II (частинка рухається із області I в II); k_1 і k_2 – відповідні значення хвильових чисел.

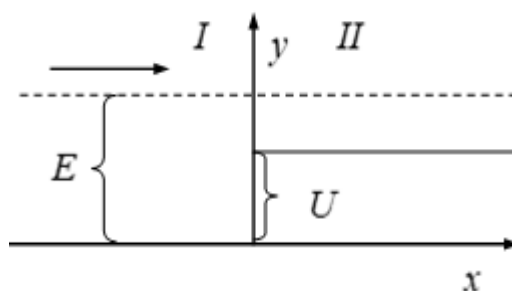


Рисунок 2.2- Проходження квантовою частинкою низького

потенціального бар'єра нескінченної ширини.

10. Коефіцієнти відбивання ρ і проходження τ хвиль де Бройля на межі низького ($U < E$) потенціального бар'єра нескінченної ширини (рис. 2.2)

$$\rho = \left| \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2} \right|^2, \quad \tau = \frac{4k_1 k_2}{(k_1 + k_2)^2},$$

де k_1 і k_2 – хвильові числа хвиль де Бройля в областях I і II.

11. Коефіцієнт прозорості D прямокутного потенціального бар'єра скінченної ширини

$$D \approx \exp \left[-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m(E - U)} \cdot d \right],$$

де U – висота потенціального бар'єра; E – енергія частинки;

d – ширина бар'єра; m – маса частинки.

Атом Бора. Рентгенівські спектри.

12. Момент імпульсу електрона на стаціонарних орбітах атома Бора

$$L = mvr = n\hbar, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

де m – маса електрона; r – радіус орбіти; v – швидкість електрона на орбіті; n – головне квантове число; $\hbar$ – стала Планка.

13. Енергія фотона, що випромінює атом водню при переході з одного стаціонарного стану в інший,

$$E = h\nu = E_m - E_n,$$

де ν - частота випромінювання; E_m і E_n – енергії атома у стаціонарних станах, з якого і на який переходить атом відповідно.

14. Енергія електрона, що знаходиться на n -й орбіті,

$$E_n = -\frac{me^4}{8\varepsilon_0 h^2 n^2}.$$

де ε_0 - електрична стала.

14. Серіальна формула (узагальнена формула Бальмера) визначає довжину хвилі світла, що випромінюється або поглинається воднеподібним атомом при переході електрона з однієї орбіти на іншу,

$$\frac{1}{\lambda} = z^2 R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

де R – стала Рідберга ($R = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$); z - заряд ядра у відносних одиницях ($z = 1$ для водню).

15. Короткохвильова межа λ_{min} безперервного рентгенівського спектра

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{|e|U},$$

де e - заряд електрона; U - різниця потенціалів, що прикладена до рентгенівської трубки; h - стала Планка.

16. Закон Мозлі у загальному випадку

$$\omega = R'(z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

де ω - частота ліній рентгенівського спектра; z - атомний номер елемента, що випромінює цей спектр; R' - стала Рідберга ($R' = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$); σ - стала екранування; $n = 1, 2, 3, \dots$; $m = n+1, n+2, \dots$

Закон Мозлі для K_α - лінії ($\sigma=1$):

$$\omega_{K_\alpha} = \frac{3}{4} R' (z-1)^2.$$

17. Енергія фотона K_α - лінії рентгенівського випромінювання

$$E_{K_\alpha} = \frac{3}{4} E_i (z-1)^2,$$

де E_i - енергія іонізації атома водню.

Електричні властивості твердих тіл.

18. Закони Ома і Джоуля-Ленца у диференціальній формі мають вигляд

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \quad \omega_p = \sigma E^2,$$

де j - густина струму; ω_p - об'ємна густина теплової потужності; σ - питома провідність; E - напруженість електричного поля.

19. Питома електрична провідність визначається співвідношенням

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{e^2 n \langle l \rangle}{m \langle u \rangle},$$

де e і m - заряд і маса електрона; n - концентрація електронів; $\langle l \rangle$ - середня довжина їх вільного пробігу; $\langle u \rangle$ - середня швидкість хаотичного руху електронів.

20. Закон Відемана-Франца має вигляд

$$\frac{\lambda}{\sigma} = 3 \frac{k^2}{e^2} T,$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності; σ - питома електропровідність; k - стала Больцмана.

21. Розподіл Фермі за енергіями для вільних електронів у металі має вигляд:

$$\text{- при } T \neq 0 \quad dn(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{h^2} \right)^{3/2} \frac{E^{1/2} dE}{\exp[(E - E_F)/kT] + 1},$$

$$\text{- при } T = 0 \quad dn(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{h^2} \right)^{3/2} E^{1/2} dE \quad (\text{при } E < E_F),$$

де $dn(E)$ - концентрація електронів, енергія яких знаходиться в інтервалі значень від E до $E+dE$; m і E - маса та енергія електрона; E_F - рівень (або енергія) Фермі.

22. Енергія рівня Фермі в металі при $T = 0$ визначається співвідношенням

$$E_F = \frac{h^2}{2m} (3\pi^2 n)^{2/3},$$

де n – концентрація вільних носіїв.

23. Температура T_ϵ виродження електронного газу дорівнює

$$T_\epsilon = \frac{2\pi h^2}{km} n^{2/3}.$$

24. Питома електропровідність власних напівпровідників визначається за формулою

$$\sigma = en(\mu_n + \mu_p),$$

де e - заряд електрона; n - концентрація носіїв заряду (електронів та дірок); μ_n і μ_p - рухливості електронів та дірок.

25. Концентрація вільних носіїв у власному напівпровіднику дорівнює

$$n_i = p_i = \frac{2(2\pi\sqrt{m_n m_p} kT)^{3/2}}{h^3} e^{-\Delta E/(2kT)} = \sqrt{N_c N_v} e^{-\Delta E/(2kT)},$$

де m_n , m_p - ефективні маси електронів та дірок; ΔE - ширина забороненої зони матеріалу; N_c , N_v - ефективна густина станів зони провідності та валентної зони відповідно.

26. Концентрація вільних носіїв у домішковому напівпровіднику дорівнює

$$n = \frac{2(2\pi m_n kT)^{3/2}}{h^3} e^{-E_a/kT} = N_c e^{-E_a/kT},$$

де E_a - енергія активації атомів домішки.

27. Залежність питомої провідності власного напівпровідника від температури визначається за формулою

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right),$$

де ΔE - ширина забороненої зони матеріалу; σ_0 - стала, що слабо залежить від температури.

28. Положення рівня Фермі у власному напівпровіднику визначається співвідношенням

$$E_F = -\frac{\Delta E}{2} + \frac{3}{4}kT \cdot \ln \frac{m_p}{m_n}.$$

29. Величина струму у p - n -переході визначається співвідношенням

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right].$$

де I_0 - струм насичення; U – зовнішня напруга на переході.

30. Напруга U_x - на гранях зразка при ефекті Холла дорівнює

$$U_x = R_x B \cdot j \cdot l,$$

де R_x - стала Холла; B - індукція магнітного поля; l - ширина пластини; j - густина струму.

31. Стала Холла для напівпровідників типу алмаза, кремнію, германію та ін., які містять носії заряду одного типу (n або p), задається співвідношенням

$$R_x = \frac{3\pi}{8} \frac{1}{en},$$

де n - концентрація носіїв заряду.

32. Магнетон Бора - елементарний магнітний момент – визначається формулою

$$\mu_B = e\hbar/(2m),$$

де e і m - заряд і маса електрона.

33. Магнітний момент ядра дорівнює

$$\mu_I = g\mu_N\sqrt{I_s(I_s + 1)},$$

де g - ядерний фактор Лінде (g -фактор); μ_N - ядерний магнетон ($\mu_N = e\hbar/2m_p$); m_p - маса протона; I_s - спінове квантове число ядра (спін ядра).

34. Магнітний момент ядра зв'язаний з моментом імпульсу L_I ядра співвідношенням

$$\mu_I = \gamma \cdot L_I,$$

де γ - гіромагнітне відношення $\gamma = \frac{g\mu_N}{\hbar}$ і $L_I = \hbar\sqrt{I_s(I_s + 1)}$.

35. Проекція магнітного моменту ядра на напрямок вектора магнітної індукції зовнішнього поля дорівнює

$$\mu_z = g \cdot \mu_N \cdot m_I,$$

де m_I - спінове магнітне квантове число ядра, $m_I = I_s, I_s - 1, \dots, -I_s$.

36. Відношення заселеностей енергетичних рівнів (за відсутності високочастотного поля) атома має вигляд

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-(E_2 - E_1)/kT},$$

де N_1 - заселеність енергетичного рівня E_1 ; N_2 - заселеність енергетичного рівня E_2 ; $E_2 > E_1$.

2.4. Будова атомних ядер. Радіоактивність.

Характеристики атомних ядер.

1. Ядро позначається тим самим символом, що і нейтральний атом:

$A_ZX,$

де X - символ хімічного елемента; Z - атомний номер (число протонів у ядрі); A - масове число (число нуклонів у ядрі). Число N нейтронів у ядрі дорівнює різниці $A - Z$.

2. Радіус ядра атома можна оцінити за формулою

$$R = R_0 \sqrt[3]{A},$$

де $R_0 = 1,4 \cdot 10^{-15}$ м; A - масове число (число нуклонів у ядрі).

3. Закон радіоактивного розпаду має вигляд

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

де N - число атомів, які не розпалися за час t ; N_0 - число атомів, які не розпалися, в момент, взятий за початковий (при $t = 0$); λ - стала радіоактивного розпаду.

4. Період напіврозпаду $T_{1/2}$ - проміжок часу, за який число атомів, які не розпалися, зменшується вдвічі. Період напіврозпаду пов'язаний зі сталою розпаду співвідношенням

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

5. Число атомів, які розпалися за час t , дорівнює

$$\Delta N = N_0 - N = N_0(1 - e^{-\lambda t}).$$

Якщо проміжок часу $\Delta t = T_{1/2}$, то для визначення числа атомів, які розпалися, можна використовувати наближену формулу

$$\Delta N \approx \lambda N \Delta t.$$

6. Середній час життя τ радіоактивного ізотопу – проміжок часу, за який кількість ядер, які не розпалися, зменшується у e разів:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}.$$

7. Кількість атомів, яка міститься у радіоактивному ізотопі, дорівнює

$$N = \frac{m}{M} N_A,$$

де m - маса ізотопу; M - його молярна маса; N_A - стала Авогадро.

8. Активність a нукліда у радіоактивному джерелі (активність ізотопу) є величина, яка дорівнює відношенню кількості dN ядер, які розпалися в ізотопі, до проміжку часу dt , за який відбувся розпад. Активність визначається за формулою

$$a = -\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

або після заміни N за основним законом радіоактивного розпаду одержимо

$$a = \lambda N_0 e^{-\lambda t}.$$

9. Активність ізотопу у початковий момент часу ($t = 0$) дорівнює

$$a = \lambda N_0.$$

10. Активність ізотопу змінюється з часом за тим самим законом, що і число ядер, які не розпалися:

$$a = a_0 \cdot e^{-\lambda t}.$$

11. Масова активність a_m радіоактивного джерела - це величина, яка дорівнює відношенню його активності a до маси m цього ізотопу, тобто

$$a_m = \frac{a}{m}.$$

12. Якщо є суміш ряду радіоактивних ізотопів, які утворюються один із іншого, і якщо стала розпаду λ першого члена ряду набагато менша від сталих усіх інших членів ряду, то у суміші встановлюється стан радіоактивної рівноваги, при якій активності всіх членів ряду рівні:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots = \lambda_k N_k.$$

13. Енергія зв'язку нуклона у ядрі

$$E_{36} = c^2 [Zm_p + (A - Z)m_n - m_a] = c^2 [Zm_H + (A - Z)m_n - m_a],$$

де m_p , m_n , m_a , m_H , m_a - маси протона, нейтрона, ядра, атома водню і атома ізотопу, відповідно; Z - зарядове число; A - масове число.

Дефект маси ядра

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_a] = [Zm_H + (A - Z)m_n - m_a].$$

Питома енергія зв'язку (енергія, що припадає на один нуклон).

$$\varepsilon_{36} = \frac{E_{36}}{A}.$$

14. Символічний запис ядерної реакції

$${}_Z^AX + a \rightarrow {}_{Z'}^{A'}Y + b \text{ або } {}_Z^AX(a,b){}_{Z'}^{A'}Y,$$

де ${}_Z^AX$ і ${}_{Z'}^{A'}Y$ - початкове і кінцеве ядра відповідно з зарядовими числами Z та Z' і масовими числами A і A' ; a - частинка, що бомбардує ядро, b - частинка, що з'являється в результаті реакції.

Енергія ядерної реакції

$$Q = [(m_1 + m_2) - (m_3 + m_4)] \cdot c^2,$$

де m_1 і m_2 - маса спокою ядра-мішені і частинки, що його бомбардує; $(m_3 + m_4)$ - сума мас спокою ядер продуктів реакції.

РОЗДІЛ 3. ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

3.1. Приклади розв'язання задач

Приклад 1. Частинка масою $m = 0,01$ кг здійснює гармонічні коливання з періодом $T = 2$ с. Повна енергія частинки, що коливається, становить $E = 0,1$ мДж. Визначити амплітуду A коливань і найбільше значення сили F_{max} , що діє на частинку.

Розв'язання. Для визначення амплітуди коливань скористаємося виразом повної енергії частинки:

$$E = \frac{m\omega^2 A^2}{2},$$

де $\omega = \frac{2\pi}{T}$. Звідси амплітуда

$$A = \frac{T}{2\pi} \sqrt{\frac{2E}{m}}.$$

Оскільки частинка здійснює гармонічні коливання, то сила, що діє на неї, є квазіпружною і, отже, може бути виражена співвідношенням $F = -kx$, де k - коефіцієнт квазіпружної сили; x - зміщення точки, що коливається. Максимальною сила буде при максимальному зміщенні x_{max} , що дорівнює амплітуді:

$$F_{max} = kA.$$

Коефіцієнт k виразимо через період коливань:

$$k = m\omega^2 = \frac{m \cdot 4\pi^2}{T^2}$$

Провівши спрощення, отримаємо

$$F_{max} = \frac{2\pi}{T} \sqrt{2mE}.$$

Проведемо обчислення:

$$A = \frac{2}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-4}}{10^{-2}}} = 0,045 \text{ м} = 45 \text{ мм},$$

$$F_{max} = \frac{2 \cdot 3,14}{2} \sqrt{2 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-4}} \text{ Н} = 4,44 \cdot 10^{-3} \text{ Н} = 4,44 \text{ мН}.$$

Відповідь: $A = 45 \text{ мм}$; $F_{max} = 4,44 \text{ мН}$.

Приклад 2. Складаються два коливання однакового напрямку, що описуються рівняннями $x_1 = A_1 \cos \frac{2\pi}{T}(t + \tau_1)$; $x_2 = A_2 \cos \frac{2\pi}{T}(t + \tau_2)$, де $A_1 = 3 \text{ см}$ $A_2 = 2 \text{ см}$ $\tau_1 = 1/6 \text{ с}$ $\tau_2 = 1/3 \text{ с}$, $T = 2 \text{ с}$. Побудувати векторну діаграму складання цих коливань і написати рівняння результуючого коливання.

Розв'язання. Для побудови векторної діаграми складання двох коливань одного напрямку треба зафіксувати який-небудь момент часу. Як правило, векторну діаграму будують для моменту часу $t = 0$. Перетворивши обидва рівняння до канонічної форми $x = A \cos(\omega t + \varphi)$, отримаємо

$$x_1 = A_1 \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \frac{2\pi}{T}\tau_1\right); x_2 = A_2 \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \frac{2\pi}{T}\tau_2\right).$$

Звідси бачимо, що обидва гармонічні коливання, які складаються, мають однакову циклічну частоту $\omega = 2\pi/T$.

Початкові фази першого і другого коливань відповідно дорівнюють

$$\varphi_1 = \frac{2\pi}{T} \tau_1, \varphi_2 = \frac{2\pi}{T} \tau_2.$$

Проведемо обчислення:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{2} = 3,14 \text{ с}^{-1},$$

$$\varphi_1 = \frac{2\pi}{2} \frac{1}{6} \text{ рад} = 30^\circ; \varphi_2 = \frac{2\pi}{2} \frac{1}{3} \text{ рад} = 60^\circ.$$

Зобразимо вектори $\vec{A}_1$ і $\vec{A}_2$. Для цього відкладемо відрізки довжиною $A_1 = 3 \text{ см}$ і $A_2 = 2 \text{ см}$ під кутами $\varphi_1 = 30^\circ$ і $\varphi_2 = 60^\circ$ до осі Ox . Результируюче коливання відбуватиметься з тією ж частотою ω і амплітудою A , що дорівнює геометричній сумі амплітуд A_1 і A_2 : $\vec{A} = \vec{A}_1 + \vec{A}_2$. Згідно з теоремою косинусів

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}.$$

Початкову фазу результируючого коливання можна також визначити безпосередньо з векторної діаграми (рис.3:1.)

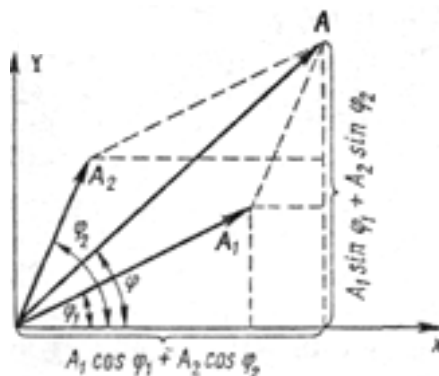


Рисунок 3.1 – Додавання коливань, що відбуваються у одному напрямку

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}.$$

Проведемо обчислення:

$$A = \sqrt{3^2 + 2^2 + 2 \cdot 3 \cdot 2 \cos(60^\circ - 30^\circ)} = 4,84 \text{ см.}$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{3 \sin 30^\circ + 2 \sin 60^\circ}{3 \cos 30^\circ + 2 \cos 60^\circ} = \operatorname{arctg} 0,898 = 42^\circ,$$

$$\text{або } \varphi = 0,735 \text{ рад.}$$

Оскільки результуюче коливання є гармонічним, має ту саму частоту, що і складові коливання, то його можна записати у вигляді

$$x = A \cos(\omega t + \varphi),$$

$$\text{де } A = 4,84 \text{ см } \omega = 3,144 \text{ с}^{-1}, \varphi = 0,735 \text{ рад.}$$

Відповідь: $x = A \cos(\omega t + \varphi)$, де $A = 4,84 \text{ см } \omega = 3,144 \text{ с}^{-1}, \varphi = 0,735 \text{ рад.}$

Приклад 3 На тонку гліцеринову плівку ($n = 1,47$) товщиною $d = 1,5$ мкм нормально до її поверхні падає біле світло. Визначити довжини хвиль видимої ділянки спектра ($0,4 \leq \lambda \leq 0,8$ мкм), які ослаблюються в результаті інтерференції.

Розв'язання. Оптична різниця ходу двох променів, відбитих від верхньої та нижньої поверхонь плівки, складає

$$\Delta = 2dn)$$

Щоб врахувати, що при відбиванні від пластинки виникає зміна фази на π , додамо до правої частини цього співвідношення $\lambda/2$:

$$\Delta = 2dn + \frac{\lambda}{2}.$$

Умова спостереження інтерференційного мінімуму має вигляд

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2},$$

де k - порядок інтерференційного максимуму.

З останніх двох рівнянь

$$\Delta = 2dn + \frac{\lambda}{2} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

Після перетворень отримаємо

$$2dn = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda}{2} = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda.$$

Звідси

$$\lambda = \frac{2dn}{k},$$

де k може набувати значення $k = 1, 2, \dots$

З цього виразу знайдемо k :

$$k = \frac{2dn}{\lambda}.$$

Після підстановки числових значень величин у співвідношення отримаємо:

$$k_{\max} = \frac{2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1,47}{0,4 \cdot 10^{-6}} = 11,25,$$

$$k_{\min} = \frac{2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1,47}{0,8 \cdot 10^{-6}} = 5,51 \text{ м.}$$

Оскільки k – ціле число, одержимо остаточно $k_{\max} = 11$, $k_{\min} = 6$.

Тоді відповідні довжини хвиль дорівнюють:

k	6	7	8	9	10	11
λ , мкм	0,735	0,63	0,557	0,49	0,441	0,401

Відповідь: $\lambda_1 = 4,01 \cdot 10^{-6}$ м; $\lambda_2 = 4,41 \cdot 10^{-6}$ м; $\lambda_3 = 4,9 \cdot 10^{-6}$ м; $\lambda_4 = 5,57 \cdot 10^{-6}$ м; $\lambda_5 = 6,3 \cdot 10^{-6}$ м; $\lambda_6 = 7,35 \cdot 10^{-6}$ м.

Приклад 4 На скляний клин з малим кутом нормально до його грані падає паралельний пучок проміння монохроматичного світла з довжиною хвилі $\lambda = 0,6$ мкм. Число m інтерференційних смуг, що при цьому виникає і припадає на відрізок клину довжиною l , дорівнює 10. Визначити кут α клину.

Розв’язання. Паралельний промінь світла, що падає нормально до грані клину, відбивається як від верхньої, так і від нижньої грані. Ці відбиті промені світла когерентні. Тому на поверхні клину будуть спостерігатись інтерференційні смуги. Оскільки кут клину малий, то відбиті промені 1 і 2 світла (рис.3.2.) практично паралельні.

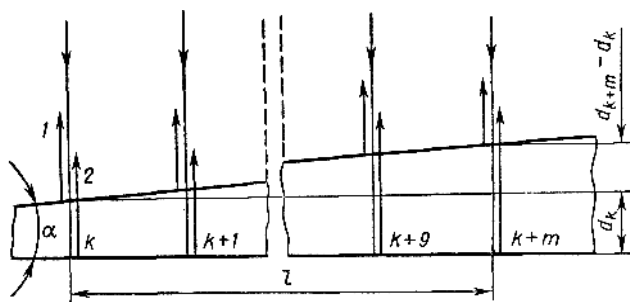


Рисунок 3.2 – Відбивання світла від клину

Темні смуги спостерігаються на тих ділянках клина, для яких різниця ходу променів кратна непарному числу половин довжини хвилі:

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2 \dots). \quad (3.1.)$$

Різниця ходу Δ двох хвиль складається з різниці оптичних довжин шляхів цих хвиль ($2dn \cos r$) і половини довжини хвилі ($\lambda/2$). Величина $\lambda/2$ є додатковою різницею ходу, що виникає при віддзеркаленні світлової хвилі 1 від оптично більш щільного середовища. Підставляючи у формулу (3.1.) різницю ходу Δ світлових хвиль, одержимо

$$2d_k n \cos r + \frac{\lambda}{2} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (3.2.)$$

де n - показник заломлення скла ($n = 1,5$); d_k - товщина клина в тому місці, де спостерігається темна смуга, що відповідає номеру k ; r - кут заломлення світла.

Згідно з умовою задачі кут падіння дорівнює нулю; отже, і кут заломлення r дорівнює нулю, а тому, $\cos r = 1$. Розкривши дужки в правій частині рівності (3.2.), після спрощення отримаємо

$$2d_k n = k\lambda. \quad (3.3.)$$

Нехай довільній темній смузі k -го номера відповідає товщина d_k клина, а темній смузі $k+m$ -го номера - товщина d_{k+m} клина. Тоді, враховуючи, що m смуг укладається на відстані l , знайдемо:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{(d_{k+m} - d_k)}{l}. \quad (3.4.)$$

При малих кутах $\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$.

Виразимо з (3.3.) d_k і d_{k+m} підставимо їх у співвідношення (3.4.). Потім, враховуючи, що $\sin \alpha = \alpha$ (через те, що кут малий), отримаємо

$$\alpha = \frac{(k+m)\lambda - k\lambda}{2nl} = \frac{m\lambda}{2nl}.$$

Підставляючи значення фізичних величин, знайдемо

$$\alpha = \frac{10 \cdot 0.6 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 1.5 \cdot 1} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ рад}.$$

Виразимо кут α в секундах. Для цього можна скористатися співвідношеннями між радіаном і секундою: $1 \text{ рад} = 206265'' \sim 2,06 \cdot 10^5$. Тоді $\alpha = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 2,06 \cdot 10^5 = 41,2''$.

Відповідь: $\alpha = 2 \cdot 10^{-4} \text{ рад} = 41,2''$.

Приклад 5 Між скляною пластинкою і плосковипуклою лінзою, що лежить на ній, знаходиться рідина (рис.3.3.). Знайти показник заломлення рідини, якщо радіус r третього темного кільця Ньютона при спостереженні у відбитому світлі з довжиною хвилі $\lambda = 0,6 \text{ мкм}$ дорівнює $0,82 \text{ мм}$. Радіус кривини лінзи $R = 0,5 \text{ м}$.

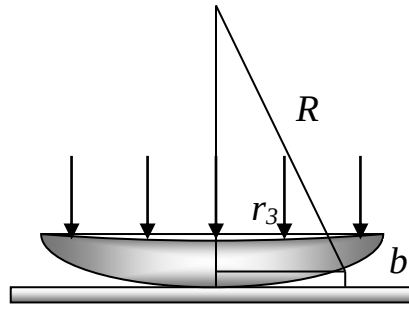


Рисунок 3.3 – Спостереження кілець Ньютона.

Розв’язання. Схема установки спостереження кілець Ньютона зображена на рис. 3.3.. З рисунка бачимо, що

$$R^2 = (R - b)^2 + r^2 = R^2 - 2Rb + r^2, \quad (3.5)$$

де R – радіус кривини лінзи; b – товщина зазору між лінзою і скляною пластинкою.

У виразі (3.5) ми знехтували величиною b^2 порівняно з $2Rb$. З цього співвідношення після простих перетворень отримаємо

$$b = \frac{r^2}{2R}.$$

Оптична різниця ходу двох променів, відбитих від верхньої і нижньої поверхонь зазору між пластиною і лінзою, дорівнює

$$\Delta = 2bn = 2 \frac{r^2}{2R} n = \frac{r^2}{R} n,$$

де n - коефіцієнт заломлення рідини у зазорі.

Щоб врахувати, що при відбитті від пластинки виникає зміна фази світла на π , до правої частини останнього виразу додамо $\lambda/2$.

Умова спостереження інтерференційного мінімуму має вигляд

$$\Delta = \pm(2k+1)\frac{\lambda}{2},$$

де k - порядок інтерференційного мінімуму.

Прирівнявши останні вирази, знайдемо

$$\frac{r^2}{R}n + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2}.$$

Після перетворень отримаємо таке співвідношення:

$$\frac{r^2}{R}n = (2k+1)\frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2}(2k+1-1) = k\lambda.$$

З цього виразу знайдемо n :

$$n = \frac{r^2}{k\lambda R}.$$

У випадку третього кільця Ньютона $k=3$.

Після підстановки числових значень фізичних величин, отримаємо

$$n = \frac{(0,82 \cdot 10^{-3})^2}{3 \cdot 0,6 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5} = 1,34.$$

Відповідь: $n = 1,34$.

Приклад 6 На поверхню дифракційної ґратки нормально до її поверхні падає монохроматичне світло. Стала дифракційної ґратки у $n=4,6$ разу більша за довжину світлової хвилі. Знайти загальне число M дифракційних максимумів, які теоретично можна спостерігати у цьому випадку.

Розв’язання. Умова спостереження дифракційного максимуму на дифракційній ґратці має вигляд

$$d \sin \varphi = \pm k \lambda ,$$

де k - порядок спектра, або у випадку монохроматичного світла порядок інтерференційного максимуму ($k = 0, 1, 2, \dots$).

Останній інтерференційний максимум, який може спостерігатися при дифракції світла на ґратці, відповідає умові

$$\varphi \rightarrow \frac{\pi}{2} \Rightarrow \sin \varphi \rightarrow 1 .$$

Звідси отримаємо, що $d = \pm k \lambda$.

Тоді порядок дифракційного максимуму дорівнює

$$k = \frac{d}{\lambda} .$$

Після підстановки числових значень величин , отримаємо

$$k = 4,6 .$$

Число k обов’язково повинно бути цілим, але воно не може набувати значення 5, оскільки у цьому випадку $\sin \varphi > 1$, що неможливо. Звідси $k = 4$. Оскільки зліва і справа від центрального максимуму спостерігається однакова кількість максимумів, одержимо $M = 2 \cdot 4 + 1 = 9$.

Відповідь: $M = 9$.

Приклад 7 Паралельний промінь світла переходить з гліцерину ($n_{\text{гл}} = 1,47$) у скло ($n_{\text{ст.}} = 1,5$) так, що світло, відбите від межі цих середовищ,

виявляється максимально поляризованим (рис.3.4). Визначити кут між падаючими та заломленими променями.

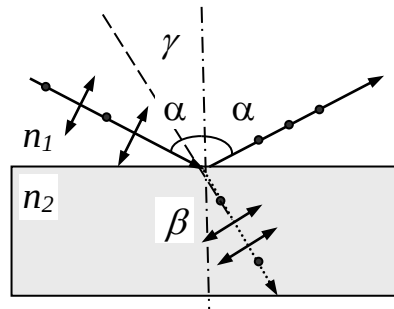


Рисунок 3.4 – Поляризація світла при відбиванні від межі поділу двох середовищ

Розв’язання. Згідно з законом Брюстера світло, відбите від межі поділу двох діелектриків, повністю поляризоване у тому випадку, якщо тангенс кута падіння дорівнює

$$\operatorname{tg} \alpha = n_{21} = \frac{n_2}{n_1},$$

де n_{21} – відносний показник заломлення середовищ; n_2, n_1 – абсолютні показники заломлення середовищ.

Звідси

$$\alpha = \arctg \frac{n_2}{n_1}.$$

Кут заломлення світла β знайдемо із закону заломлення

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1}.$$

З цього виразу маємо

$$\sin \beta = \frac{n_1}{n_2} \sin \alpha$$

або

$$\beta = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha\right).$$

Кут γ , як бачимо з рисунка, дорівнює

$$\gamma = \alpha - \beta.$$

Підставивши числові значення у вирази, отримаємо

$$\alpha = \arctg \frac{1,5}{1,47} = 45^{\circ}30'.$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{1,47}{1,5} \sin 45^{\circ}30'\right) = 44^{\circ}14'.$$

$$\gamma = 1^{\circ}16'.$$

Відповідь: $\gamma = 1^{\circ}16'$.

Приклад 8. У скільки разів ослаблюється інтенсивність світла, що проходить через два ніколі, площини пропускання яких утворюють кут $\alpha = 30^{\circ}$, якщо у кожному ніколі окремо втрачається 10% інтенсивності світла, що падає на нього (рис.3.5.).

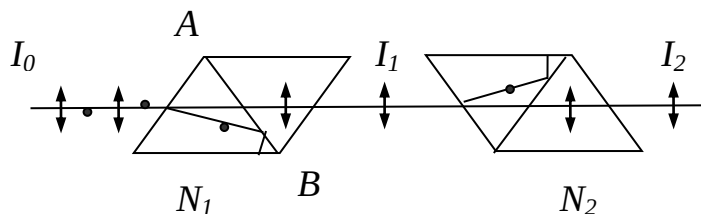


Рисунок 3.5 – Поляризація світла при проходженні через ніколі

Розв’язання. Промінь світла, що падає на грань ніколя N_1 , розщеплюється внаслідок явища подвійного променезаломлення на два:

звичайний і незвичайний. При цьому обидва промені мають однакову інтенсивність і повністю поляризовані. Площина коливань незвичайного променя лежить у площині креслення, у той час як для звичайного вона перпендикулярна до цієї площини.

Звичайний промінь внаслідок повного внутрішнього відбиття відбивається від межі АВ і через ніколь N_1 не проходить. Незвичайний промінь проходить через ніколь, при цьому інтенсивність світла зменшується вдвічі. Додаткове зменшення інтенсивності незвичайного променя відбувається внаслідок поглинання світла у речовині ніколя.

Таким чином, інтенсивність світла, що пройшло через ніколь N_1 , дорівнює

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0 (1 - k),$$

де I_0 - інтенсивність природного світла, що падає на ніколь N_1 ; I_1 - інтенсивність поляризованого світла, що пройшов через ніколь; k - коефіцієнт поглинання світла у ніколі.

Промінь плоскополяризованого світла інтенсивністю I_1 , що падає на ніколь N_2 , теж розщеплюється на два промені: звичайний і незвичайний. При цьому звичайний промінь повністю поглинається в ніколі, а інтенсивність незвичайного променя, що виходить з ніколя, визначається законом Малюса

$$I_2 = I_1 \cos^2 \alpha ,$$

де α - кут між площиною коливань у поляризованому промені і площиною пропускання Ніколя N_2 .

З урахуванням втрат енергії внаслідок поглинання світла у другому ніколі отримаємо

$$I_2 = I_1(1-k)\cos^2 \alpha .$$

Зробивши перетворення, отримаємо

$$I_2 = I_0(1-k)^2 \cos^2 \alpha .$$

Звідси відношення інтенсивності світла на вході і виході з ніколей дорівнює

$$n = \frac{I_0}{I_2} = \frac{1}{(1-k)^2 \cos^2 \alpha} .$$

Підставивши значення фізичних величин, знайдемо шукану величину

$$n = \frac{2}{(1-0,1)^2 \cos^2 30^0} = 3,3 .$$

Відповідь: $n = 3,3$.

Приклад 9 Як і у скільки разів зміниться потік енергії, що випромінюється абсолютно чорним тілом, якщо максимум енергії випромінювання переміститься з червоної межі видимого спектра ($\lambda_{m1} = 780$ нм) на фіолетову ($\lambda_{m2} = 390$ нм)?

Розв'язання. Потік енергії, що випромінюється тілом, дорівнює

$$\Phi_e = R_e S ,$$

де R_e – енергетична світність абсолютно чорного тіла; S - його площа.

Енергетичну світність абсолютно чорного тіла визначимо з рівняння Стефана-Больцмана

$$R_e = \sigma T^4 .$$

Для знаходження температури тіла скористаємося законом зміщення Віна

$$\lambda_m = \frac{b}{T} \Rightarrow T = \frac{b}{\lambda_m}.$$

Тоді одержимо

$$\Phi_e = \sigma \left(\frac{b}{\lambda_m} \right)^4 S.$$

Для різних довжин хвиль потік енергії, що випромінюється тілом, визначається такими виразами:

$$\Phi_{e1} = \sigma \left(\frac{b}{\lambda_{m1}} \right)^4 S,$$

$$\Phi_{e2} = \sigma \left(\frac{b}{\lambda_{m2}} \right)^4 S.$$

Розділивши рівняння, одержимо

$$\frac{\Phi_{e2}}{\Phi_{e1}} = \frac{\sigma (b / \lambda_{m2})^4 S}{\sigma (b / \lambda_{m1})^4 S} = \left(\frac{\lambda_{m1}}{\lambda_{m2}} \right)^4.$$

Підставивши числові значення величин, одержимо

$$\frac{\Phi_{e2}}{\Phi_{e1}} = \frac{(780 \cdot 10^{-9})^4}{(390 \cdot 10^{-9})^4} = (2)^4 = 16.$$

Відповідь: $\frac{\Phi_{e2}}{\Phi_{e1}} = 16$.

Приклад 10 На металічну пластину падає монохроматичний пучок світла з частотою $\nu = 7,3 \cdot 10^{14}$ Гц. Червона межа фотоефекту для даного матеріалу дорівнює $\lambda_0 = 560$ нм. Визначити максимальну швидкість $v_{\max}$ фотоелектронів.

Розв’язання. Для визначення максимальної швидкості фотоелектронів скористаємось рівнянням Ейнштейна для фотоефекту

$$h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}.$$

Робота виходу фотоелектронів з металу дорівнює

$$A = h \frac{c}{\lambda_0}.$$

Одержимо:

$$h\nu = h \frac{c}{\lambda_0} + \frac{mv_{\max}^2}{2}.$$

Розв’язавши це рівняння відносно швидкості, одержимо $v_{\max}$:

$$v_{\max}^2 = \frac{2h}{m} \left(\nu - \frac{c}{\lambda_0} \right),$$

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2h}{m} \left(\nu - \frac{c}{\lambda_0} \right)}.$$

Підставивши числові значення фізичних величин в останнє співвідношення одержимо відповідь:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6,63 \cdot 10^{-34}}{9,1 \cdot 10^{-31}} \left(7,3 \cdot 10^{14} - \frac{3 \cdot 10^8}{560 \cdot 10^{-9}} \right)} = 5,32 \cdot 10^5 \text{ м/с.}$$

Відповідь: $v_{\max} = 5,32 \cdot 10^5 \text{ м/с.}$

Приклад 11 Фотон з енергією $E = 10 \text{ еВ}$ падає на срібну пластину і викликає фотоефект. Визначити імпульс p , отриманий пластиною, вважаючи, що напрями руху фотона і фотоелектрона лежать на одній прямій, перпендикулярній до поверхні пластини.

Розв’язання. При падінні фотона на срібну пластинку з неї вибивається фотоелектрон. Закон збереження імпульсу в даному випадку має вигляд

$$\vec{p}_\phi = \vec{p} + \vec{p}_e,$$

де $\vec{p}_\phi$, $\vec{p}$, $\vec{p}_e$ - імпульси фотона, пластинки та електрона відповідно.

Звідси з урахуванням напрямків векторів отримаємо:

$$p = p_\phi + p_e.$$

Імпульс фотона дорівнює

$$p_\phi = \frac{E}{c},$$

де c – швидкість світла.

Імпульс електрона визначається співвідношенням

$$p_e = m v_e .$$

Швидкість фотоелектрона знайдемо з рівняння Ейнштейна для фотоефекту:

$$E = A + \frac{m v_e^2}{2} \Rightarrow v_e = \sqrt{\frac{2(E - A)}{m}} .$$

Одержимо

$$p_e = m \sqrt{\frac{2(E - A)}{m}} = \sqrt{2m(E - A)} .$$

Тоді отримаємо:

$$p = \frac{E}{c} + \sqrt{2m(E - A)} .$$

Після підстановки числових значень величин одержимо відповідь:

$$p = \frac{10 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{3 \cdot 10^8} + \sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} (10 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} - 7,5 \cdot 10^{-19})} = 1,24 \cdot 10^{-19} \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с} .$$

Відповідь: $p = 1,24 \cdot 10^{-19} \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с} .$

Приклад 12 Визначити імпульс електрона віддачі, якщо фотон з енергією $E = 1,53 \text{ МеВ}$ у результаті розсіювання на вільному електроні втратив $1/3$ своєї енергії.

Розв'язання. Для розв'язання задачі спочатку знайдемо енергію розсіяного фотона. Для цього скористаємося формулою Комптона

$$\lambda' - \lambda = \frac{2\pi\hbar}{mc}(1 - \cos\theta),$$

де λ, λ' - довжини хвиль фотона, що падає на електрон, та розсіяного відповідно.

Виразимо довжини хвиль λ' і λ відповідних фотонів через їх енергії E' і E . У результаті одержимо

$$\frac{2\pi\hbar c}{E'} - \frac{2\pi\hbar c}{E} = \frac{2\pi\hbar}{mc}(1 - \cos\theta).$$

Поділимо обидві частини цієї рівності на $2\pi\hbar c$:

$$\frac{1}{E'} - \frac{1}{E} = \frac{1 - \cos\theta}{mc^2}.$$

Врахуємо, що за умовою задачі енергія розсіяного фотона складає $E' = \frac{2E}{3}$, звідси одержимо:

$$\frac{3}{2E} - \frac{1}{E} = \frac{1 - \cos\theta}{mc^2},$$

$$\frac{1}{2E} = \frac{1 - \cos\theta}{mc^2},$$

$$1 - \cos\theta = \frac{mc^2}{2E}.$$

Тепер знайдемо енергію розсіяного фотона E' :

$$E' = \frac{E}{E(1 - \cos \theta) / mc^2 + 1}.$$

Кінетичну енергію електрона віддачі можна визначити за законом збереження енергії:

$$E_k = E - E' = E - \frac{E}{E(1 - \cos \theta) / mc^2 + 1}.$$

Кінетична енергія пов'язана з імпульсом частинки співвідношенням

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{(mv)^2}{2m} = \frac{p_e^2}{2m}.$$

Звідси

$$p_e = \sqrt{2mE_k}.$$

Тоді одержимо

$$p_e = \sqrt{2m\left(E - \frac{E}{E(1 - \cos \theta) / mc^2 + 1}\right)}.$$

Нарешті, знайдемо

$$p_e = \sqrt{2m\left(E - \frac{E}{\frac{Emc^2}{2E / mc^2} + 1}\right)} = \sqrt{2m\left(E - \frac{2E}{3}\right)} = \sqrt{2mE \frac{1}{3}} = \sqrt{\frac{2}{3}} mE.$$

Після підстановки числових величин, одержимо остаточно

$$p_e = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,53 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 4,71 \cdot 10^{-22} \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с}.$$

Відповідь: $p_e = 4,71 \cdot 10^{-22} \text{ Н} \cdot \text{с} = 0,88 \text{ МеВ/с}.$

Приклад 13 Тиск світла на дзеркальну поверхню $P = 5 \text{ мПа}.$
Визначити концентрацію n_0 фотонів поблизу поверхні, якщо довжина хвилі світла, що падає на поверхню, $\lambda = 0,5 \text{ мкм}.$

Розв’язання. Сила світлового тиску на поверхню дорівнює добутку тиску P на площу поверхні S :

$$F = PS.$$

Світловий тиск визначається за формулою

$$P = E_e(\rho + 1) \frac{1}{c},$$

де E_e – енергетична освітленість поверхні; ρ – коефіцієнт її віддзеркалення.

Одержимо

$$F = PS = E_e(\rho + 1) \frac{S}{c} = \frac{\Phi_e}{c}(\rho + 1),$$

де Φ_e – потужність випромінювання (потік випромінювання)

Звідси

$$\Phi_e = \frac{PSc}{\rho + 1}.$$

Добуток енергії E одного фотона на число фотонів n , що за одну секунду падають на поверхню, дорівнює потужності випромінювання. Звідси потік випромінювання $\Phi_e = En$. Енергія фотона дорівнює $E = \frac{hc}{\lambda}$, тоді

$$\Phi_e = \frac{hcn}{\lambda}, \Rightarrow n = \frac{\Phi_e \lambda}{hc}.$$

Число фотонів, що падає на одиницю поверхні, можна знайти з виразу

$$n_0 = \frac{n}{S} = \frac{\Phi_e \lambda}{hcS}.$$

Одержимо

$$n_0 = \frac{\lambda}{hcS} \cdot \frac{PSc}{\rho + 1} = \frac{\lambda P}{h(\rho + 1)}.$$

Після підстановки числових значень величин знайдемо відповідь:

$$n_0 = \frac{0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{6,63 \cdot 10^{-34} (1+1)} = 12,6 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}.$$

Відповідь: $n_0 = 12,6 \cdot 10^{15} \text{ 1/м}^3$.

Приклад 14. Електрон, початковою швидкістю якого можна знехтувати, пройшов прискорювальну різницю потенціалів U . Знайти довжину хвилі де Бройля λ для двох випадків:

$$1) U_1 = 60 \text{ В}; \quad 2) U_2 = 600 \text{ кВ}.$$

Розв'язання. Довжина хвилі де Бройля λ частинки залежить від її імпульсу p і визначається виразом

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p}.$$

Імпульс частинки можна знайти, якщо відома її кінетична енергія E_k . Зв'язок імпульсу з кінетичною енергією для нерелятивістського (коли $E_k \ll E_0$) і релятивістського (коли $E_k \approx E_0$) випадків визначається співвідношеннями:

$$p = \sqrt{2mE_k}, \quad p = \frac{1}{c} \sqrt{(2E_0 + E_k)E_k},$$

де $E_0 = mc^2$ - енергія спокою частинки.

Довжина хвилі де Бройля з урахуванням цих співвідношень запишеться у нерелятивістському та релятивістському випадках таким чином:

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2mE_k}}, \quad \lambda = \frac{2\pi\hbar c}{\sqrt{(2E_0 + E_k)E_k}}.$$

Порівняємо кінетичні енергії електронів, що пройшли задані в умові задачі різниці потенціалів $U_1 = 60 \text{ В}$, $U_2 = 600 \text{ кВ}$, з енергією спокою електрона і залежно від цього зробимо висновок, яку з наведених формул необхідно використовувати для розрахунків довжини хвилі де Бройля.

Кінетична енергія електрона, що пройшов прискорювальну різницю потенціалів U , дорівнює

$$E_k = |e|U.$$

У першому випадку $E_{k1} = |e|U_1 = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 60 = 60 \cdot e\text{В} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ МеВ}$, тобто кінетична енергія набагато менша від енергії спокою електрона

$E_0 = mc^2 = 0,51 \text{ MeV}$. Тому для розрахунків можна використати нерелятивістську формулу.

У другому випадку кінетична енергія $E_{k2} = |e|U_2 = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6 \cdot 10^5 = 0,6 \cdot \text{MeV}$, тобто більша, ніж енергія спокою електрона. Тому в цьому випадку необхідно використати релятивістську формулу.

Тоді

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2meU}}, \quad \lambda = \frac{2\pi\hbar c}{\sqrt{(2mc^2 + eU)eU}}.$$

Після підставлення числових значень фізичних величин у співвідношення (30) одержимо відповідь:

$$\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 60}} = 1,58 \cdot 10^{-10} \text{ м},$$

$$\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{\frac{1}{3 \cdot 10^8} \sqrt{(2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 + 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6 \cdot 10^5)} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6 \cdot 10^5} = 1,26 \cdot 10^{-12} \text{ м}.$$

Перевіримо розмірності одержаної величини:

$$\frac{|\hbar|}{(|m||e||U|)^{1/2}} = \frac{1 \text{ Дж} \cdot \text{с}}{(1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В})^{1/2}} = \left(\frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ кг}} \right)^{1/2} 1 \text{ с} = \left(\frac{1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2}{1 \text{ кг}} \right)^{1/2} \cdot 1 \text{ с} = 1 \text{ м}.$$

Відповідь: $\lambda_1 = 1,58 \cdot 10^{-10} \text{ м}$; $\lambda_2 = 1,26 \cdot 10^{-12} \text{ м}$.

Приклад 15. Кінетична енергія електрона в атомі водню приблизно дорівнює $E_k = 10$ еВ. Використовуючи співвідношення невизначеностей, оцінити мінімальні лінійні розміри атома.

Розв’язання. Для розв’язання задачі використаємо співвідношення невизначеностей

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar,$$

де Δx – невизначеність координати частинки; Δp_x – невизначеність імпульсу частинки; $\hbar$ – стала Планка.

Нехай атом має лінійні розміри l , тоді електрон атома буде перебувати десь в межах цієї області з похибкою

$$\Delta x = \frac{l}{2}.$$

У цьому випадку співвідношення невизначеностей набуває вигляду

$$\left(\frac{l}{2}\right) \Delta p_x \geq \hbar,$$

звідси

$$l \geq \frac{2\hbar}{\Delta p_x}.$$

Фізично розумна невизначеність імпульсу Δp_x не повинна перевищувати значення самого імпульсу p_x , тобто $\Delta p_x \leq p_x$. Імпульс p_x пов’язаний з кінетичною енергією E_k співвідношенням

$$p_x = \sqrt{2mE_k}.$$

Підставивши ці вирази у (31) та перейшовши від нерівності до рівності, одержимо

$$l_{\min} = \frac{2\hbar}{\sqrt{2mE_k}}.$$

Після підставлення числових значень фізичних величин одержимо відповідь:

$$l_{\min} = \frac{2 \cdot 1,05 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10}} = 1,23 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Проведемо перевірку одиниць одержаної величини:

$$\frac{|\hbar|}{(|m||E_k|)^{1/2}} = \frac{1 \text{ Дж} \cdot \text{с}}{(1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ Дж})^{1/2}} = \left(\frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ кг}} \right)^{1/2} 1 \text{ с} = \left(\frac{1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2}{1 \text{ кг}} \right)^{1/2} \cdot 1 \text{ с} = 1 \text{ м}.$$

Відповідь: $l_{\min} = 1,23 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$

Приклад 16. Електрон перебуває у потенціальній ямі шириною l (рис.3.6.). В яких точках у інтервалі $(0 \leq x \leq l)$ густина ймовірності перебування електрона на першому та другому енергетичних рівнях однакова? Розрахувати густину ймовірності для цих точок.

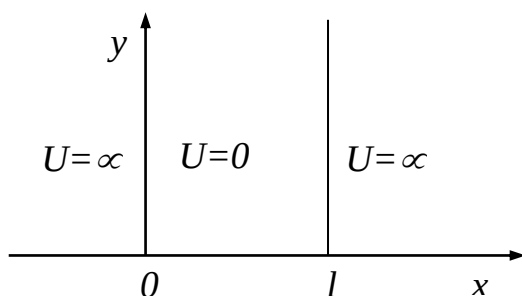


Рисунок 3.6 - Частинка в одновимірній потенціальній ямі

Згідно з умовою квантова частинка може рухатись тільки вздовж осі x . При цьому рух обмежується непроникними для частинки стінками: $x=0$ і $x=l$. Потенціальна енергія у цьому випадку має вигляд, зображений на рис.61: вона дорівнює нулю при $0 \leq x \leq l$ і обертається у нескінченність при $x < 0$ та $x > l$.

Для розв'язання задачі використаємо рівняння Шредінгера для одновимірного випадку

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi = 0$$

За межі потенціальної ями частинка потрапити не може. Тому ймовірність виявлення частинки зовні ями дорівнює нулю. Відповідно і функція ψ за межами потенціальної ями повинна дорівнювати нулю. Із умови неперервності випливає, що хвильова функція ψ дорівнює нулю і на межах ями, тобто

$$\psi(0) = \psi(l) = 0$$

Цю умову повинен задовольняти розв'язок рівняння Шредінгера.

В області $0 < x < l$, де хвильова функція не дорівнює нулю, рівняння має вигляд

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}E\psi = 0$$

(у цій області $U=0$). Введемо позначення

$$k^2 = \frac{2m}{\hbar^2}E,$$

у результаті отримаємо добре відоме з теорії коливань співвідношення

$$\psi'' + k^2\psi = 0.$$

Розв'язок цього рівняння має вигляд

$$\psi(x) = A \sin(kx + \alpha).$$

Умову (37) можна задовольнити відповідним вибором сталих k і α . Із умови $\psi(0) = 0$ одержимо

$$\psi(0) = A \sin \alpha = 0,$$

звідси випливає, що стала α повинна дорівнювати нулю. Крім того, має виконуватись умова

$$\psi(l) = A \sin kl = 0,$$

що можливо лише у випадку, якщо

$$kl = \pm n\pi \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

($n=0$ не має фізичного змісту, оскільки при цьому $\psi \equiv 0$, тобто частинка не існує).

Одержимо власні функції частинки у потенціальному ящику шириною l :

$$\psi_n(x) = A \sin \frac{n\pi x}{l}.$$

Для знаходження коефіцієнта A використаємо умову нормування хвильової функції, яка у даному випадку має вигляд

$$A^2 \int_0^l \sin^2 \frac{n\pi x}{l} dx = 1$$

На кінцях проміжку інтегрування підінтегральна функція перетворюється у нуль. Тому значення інтеграла можна одержати,

помноживши середнє значення $\sin^2\left(\frac{n\pi x}{l}\right)$ (яке, як добре відомо, дорівнює 0,5)

на довжину проміжку l : $A^2 \left(\frac{1}{2}\right)l = 1$, звідки $A = \sqrt{\frac{2}{l}}$. Таким чином, власні функції мають вигляд

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{n\pi x}{l},$$

де $n = 1, 2, 3, \dots$

На першому та другому енергетичних рівнях ці функції мають вигляд

$$\psi_1(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{\pi x}{l}, \quad \psi_2(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{2\pi x}{l}$$

Ймовірність перебування частинки у будь-якій точці потенціальної ями на цих рівнях визначається співвідношеннями:

$$W_1 = \int_0^l \psi_1^2(x) dx = \int_0^l \frac{2}{l} \sin^2 \frac{\pi x}{l} dx,$$

$$W_2 = \int_0^l \psi_2^2(x) dx = \int_0^l \frac{2}{l} \sin^2 \frac{2\pi x}{l} dx.$$

Згідно з умовою задачі густина ймовірності перебування квантової частинки у деяких точках на першому і другому рівнях енергії однакова, звідси $\psi_1^2(x) = \psi_2^2(x)$. Після зіставлення співвідношень (39) одержимо

$$\frac{2}{l} \sin^2 \frac{\pi x}{l} = \frac{2}{l} \sin^2 \frac{2\pi x}{l}.$$

Розв'язавши тригонометричне рівняння $\sin \frac{\pi x}{l} = \pm \sin \frac{2\pi x}{l}$, одержимо $x_1 = \frac{l}{3}, x_2 = \frac{2l}{3}$.

Підставивши відповідні значення x у співвідношення $\psi\psi^* = \frac{2}{l} \sin^2 \frac{\pi x}{l}$, одержимо відповідь:

$$\psi\psi^*_1 = \frac{2}{l} \sin^2 \frac{\pi}{3} = \frac{2}{l} \cdot \frac{3}{4} = \frac{3}{2l}, \quad \psi\psi^*_2 = \frac{2}{l} \sin^2 \frac{2\pi}{3} = \frac{3}{2l}.$$

Відповідь: $\psi\psi^* = \frac{3}{2l}$.

Приклад 17 Визначити довжину хвилі λ_{K_α} і енергію E_{K_α} фотона K_α -лінії рентгенівського спектра, що випромінюється ренієм при бомбардуванні його швидкими електронами.

Розв'язання. При бомбардуванні ренію швидкими електронами виникає рентгенівське випромінювання, що має лінійчастий спектр. Ці електрони проникають всередину електронної оболонки атома та вибивають електрони, що належать до глибинних електронних оболонок. Найближча до ядра електронна оболонка (K -оболонка) має два електрони. Якщо один з цих електронів виявляється вибитим за межі атома, то на вільне місце переходить електрон з оболонки, що лежить вище (L, M, N). При цьому виникає

відповідна лінія K -серії. При переході електрона з L -оболонки на K -оболонку випромінюється найінтенсивніша K_α лінія рентгенівського спектра.

Довжина хвилі цієї лінії визначається за законом Мозлі:

$$\frac{1}{\lambda_{K_\alpha}} = \frac{3}{4} R (Z-1)^2.$$

З цього співвідношення

$$\lambda_{K_\alpha} = \frac{4}{3R(Z-1)^2}.$$

Після підставлення значень фізичних величин одержимо відповідь

$$\lambda_{K_\alpha} = \frac{4}{3 \cdot 1,1 \cdot 10^7 (75-1)^2} = 2,2 \cdot 10^{-11} \text{ м}.$$

Знаючи довжину хвилі, визначимо енергію фотона за виразом

$$E_{K_\alpha} = \frac{2\pi\hbar c}{\lambda}.$$

Після підставлення числових значень величин знайдемо

$$E_{K_\alpha} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{2,2 \cdot 10^{-11}} = 5,64 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}.$$

Відповідь: $\lambda_{K_\alpha} = 2,2 \cdot 10^{-11} \text{ м}$; $E_{K_\alpha} = 5,64 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}$.

Приклад 19 Електрон у збудженому атомі гелію перейшов з п'ятого енергетичного рівня на другий. Визначити енергію фотона, що при цьому випромінюється.

Розв'язання. Для визначення енергії фотона скористаємось серіальною формулою для воднеподібних іонів

$$\frac{1}{\lambda} = Rz^2 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

де λ - довжина хвилі фотона; R - стала Рідберга; z - заряд ядра у відносних одиницях (при $z = 1$ формула набирає вигляду, що є характерним для водню); n - номер орбіти, на яку перейшов електрон; m - номер орбіти, з якої перейшов електрон (n і m - головні квантові числа).

Енергія фотона E визначається співвідношенням

$$E = \frac{hc}{\lambda}.$$

Помноживши обидві частини цього рівняння на hc , одержимо вираз для енергії фотона у вигляді

$$E = Rhcz^2 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right).$$

Оскільки всі величини у співвідношенні відомі, проведемо розрахунок E :

$$E = 1,1 \cdot 10^7 \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 2^2 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{5^2} \right) = 1,83 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = 11,48 \text{ eV}.$$

Відповідь: $E = 1,83 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = 11,48 \text{ eV}.$

Приклад 20. Знайти енергію основного стану атома водню.

Розв'язання. Рівняння Шредінгера для тривимірного випадку має вигляд

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0$$

Оскільки задача є симетричною, це рівняння зручно записати у сферичних координатах. Зв'язок між декартовими та сферичними координатами має такий вигляд:

$$x = r \sin \theta \cos \varphi,$$

$$y = r \sin \theta \sin \varphi,$$

$$z = r \cos \theta.$$

Після підставлення цих виразів рівняння Шредінгера набирає вигляду

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} = -\frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi$$

Для того щоб одержати рівняння Шредінгера для атома водню, необхідно врахувати, що потенціальна енергія електрона має вигляд $U = -k \frac{e^2}{r}$

, де $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$. Як розв'язок диференціального рівняння хвильову функцію візьмемо у вигляді $\psi = e^{-r/a}$. Підставляючи цей вираз у рівняння Шредінгера і

враховуючи, що часткові похідні $\frac{\partial \psi}{\partial \theta}$ та $\frac{\partial \psi}{\partial \varphi}$ перетворюються у нуль, одержимо

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial (e^{-r/a})}{\partial r} \right) = -\frac{2m}{\hbar^2} \left(E + \frac{k_0 e^2}{r} \right) e^{-r/a}.$$

Після ряду перетворень одержимо:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(-\frac{r^2}{a} e^{-r/a} \right) = -\frac{2m}{\hbar^2} \left(E + \frac{k_0 e^2}{r} \right) e^{-r/a},$$

$$\frac{1}{r^2} \left(\frac{r^2}{a} - \frac{2r}{a} \right) = -\frac{2m}{\hbar^2} \left(E + \frac{k_0 e^2}{r} \right),$$

$$\left(\frac{1}{a^2} \right) - \left(\frac{2}{a} \right) \frac{1}{r} = -\left(\frac{2mE}{\hbar^2} \right) - \left(\frac{2mk_0 e^2}{\hbar^2} \right) \frac{1}{r}.$$

Прирівняємо члени, що містять $\frac{1}{r}$:

$$\left(\frac{2}{a} \right) = \left(\frac{2mk_0 e^2}{\hbar^2} \right),$$

звідси

$$a = \frac{\hbar^2}{k_0 m e^2}.$$

Тоді::

$$\left(\frac{1}{a^2}\right) = -\left(\frac{2mE}{\hbar^2}\right),$$

тоді

$$E = -\frac{\hbar^2}{2ma^2}.$$

Підставляючи у це рівняння співвідношення (48), одержимо кінцевий результат

$$E = -k_0^2 \frac{me^4}{2\hbar^2} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{me^4}{2\hbar^2}.$$

Після підставлення числових значень m , e , $\hbar$ знайдемо

$$E = -\left(\frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}\right)^2 \cdot \frac{9,1 \cdot 10^{-31} (1,6 \cdot 10^{-19})^4}{2 \cdot (1,05 \cdot 10^{-34})^2} = -21,8 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = -13,6 \text{ eB}.$$

Відповідь: $E = -21,8 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = -13,6 \text{ eB}.$

Приклад 21. Моноенергетичний потік електронів ($E = 100 \text{ eB}$) падає на низький прямокутний потенціальний бар'єр нескінченної ширини (рис.64). Визначити висоту потенціального бар'єра U , якщо відомо, що 4% електронів, що падають на бар'єр відбиваються.

Розв'язання. Коефіцієнт відбиття електронів від низького потенціального бар'єра задається виразом

$$\rho = \left| \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2} \right|^2,$$

де k_1 і k_2 – хвильові числа, які відповідають руху електронів у областях I та II .

В області I кінетична енергія електрона дорівнює E_k , відповідно хвильове число задається виразом

$$k_1 = \frac{1}{\hbar} \sqrt{2mE_k}.$$

Оскільки координата електрона не визначена, імпульс електрона визначається точно, а із цього випливає, що можна говорити про точне значення його кінетичної енергії.

В області II кінетична енергія електрона дорівнює $E - U$, відповідно хвильове число записується у вигляді

$$k_2 = \frac{1}{\hbar} \sqrt{2m(E - U)}.$$

Тоді коефіцієнт відбиття можна записати таким чином:

$$\rho = \left(\frac{\sqrt{2mE} - \sqrt{2m(E - U)}}{\sqrt{2mE} + \sqrt{2m(E - U)}} \right)^2.$$

Поділимо чисельник та знаменник дробу на $\sqrt{2mE}$:

$$\rho = \left(\frac{1 - \sqrt{1 - \frac{U}{E}}}{1 + \sqrt{1 + \frac{U}{E}}} \right)^2.$$

Розв'язавши це рівняння відносно $\sqrt{1 - \frac{U}{E}}$, одержимо

$$\sqrt{1 - \frac{U}{E}} = \frac{1 - \sqrt{\rho}}{1 + \sqrt{\rho}}.$$

Підносячи обидві частини рівності до квадрата, знайдемо висоту потенціального бар'єра

$$U = \left[1 - \left(\frac{1 - \sqrt{\rho}}{1 + \sqrt{\rho}} \right)^2 \right] E.$$

Після підставлення числових значень фізичних величин у співвідношення знайдемо відповідь:

$$U = \left[1 - \left(\frac{1 - \sqrt{0,04}}{1 + \sqrt{0,04}} \right)^2 \right] 100 = 55,6 \text{ eV}.$$

Відповідь: $U = 55,6 \text{ eV}$.

Приклад 22. Визначити масу ізотопу $^{127}_{59}\text{I}$, що має активність $A = 37$ ГБк.

Розв'язання. Активність радіоактивного ізотопу пов'язана з числом атомів співвідношенням

$$A = \lambda N ,$$

де λ – стала радіоактивного розпаду.

Ця стала може бути визначена за періодом напіврозпаду ізотопу

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} .$$

За визначенням кількість молів речовини дорівнює

$$\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{\mu} \Rightarrow m = \frac{N}{N_A} \mu ,$$

де μ – молярна маса ізотопу йоду; N_A - число Авогадро.

Тоді одержимо

$$A = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \frac{m}{\mu} N_A .$$

Звідси

$$m = \frac{A T_{1/2} \mu}{N_A \ln 2} .$$

Після підставлення числових значень фізичних величин одержимо

$$m = \frac{131 \cdot 10^{-3} \cdot 37 \cdot 10^{12} \cdot 8 \cdot 24 \cdot 3600}{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 0,693} = 8,03 \cdot 10^{-6} \text{ кг.}$$

Відповідь: $m = 8,03 \cdot 10^{-6}$ кг.

Приклад 23. Період напіврозпаду ізотопу стронцію $^{90}_{38}\text{Sr}$ складає 28 років. Знайти середній час життя ядра цього ізотопу.

Розв'язання. Кількість ядер $dN(t)$, що розпадаються за проміжок часу від t до $t+dt$, дорівнює

$$dN = -\lambda N dt,$$

де λ – стала розпаду.

Час життя кожного з цих ядер дорівнює t . Сума часів життя всіх N_0 ядер, які були при $t=0$, може бути отримана інтегруванням виразу $t dN(t)$. Розділивши результат на N_0 , отримаємо середній час життя радіоактивного ядра:

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t dN(t) = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N(t) dt = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N_0 \exp(-\lambda t) dt = \\ &= \int_0^{\infty} t \lambda \exp(-\lambda t) dt = \frac{1}{\lambda}.\end{aligned}$$

З урахуванням того, що стала розпаду λ і період напіврозпаду пов'язані співвідношенням

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}},$$

отримаємо

$$\tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}.$$

Після підставлення числових значень величин у співвідношення знайдемо

$$\tau = \frac{28}{0,693} = 40,4 \text{ року.}$$

Відповідь: $\tau = 40,4$ року.

Приклад 24. Середній час життя атомів деякої радіоактивної речовини $\tau = 1$ с. Визначити ймовірність ω того, що ядро атома розпадеться за проміжок часу $t = 1$ с.

Розв'язання. За проміжок часу t розпадається кількість атомів

$$\Delta N = N_0 - N = N_0 [1 - \exp(-\lambda t)] = N_0 [1 - \exp(-t / \tau)].$$

Ймовірність розпаду одного атома дорівнює

$$\omega = \frac{\Delta N}{N_0} = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right).$$

Після підставлення числових значень у це співвідношення знайдемо

$$\omega = 1 - \exp\left(-\frac{1}{1}\right) = 0,63.$$

Відповідь: $\omega = 0,63$.

Приклад 25. Знайти енергію реакції ${}^9_4\text{Be} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^6_3\text{Li}$, якщо відомо, що кінетична енергія протона $E_p = 5,45$ МеВ, ядра гелію $E_{\text{He}} = 4$ МеВ, і що ядро гелію вилетіло під кутом $\alpha = 90^\circ$ до напрямку руху протона. Ядро-мішень ${}^9_4\text{Be}$ нерухоме.

Розв’язання. Енергія реакції Q є різницею між сумою кінетичних енергій ядер-продуктів реакції і кінетичною енергією ядра, що викликає реакцію

$$Q = E_{\text{Li}} + E_{\text{He}} - E_p.$$

У цьому виразі невідома кінетична енергія E_{Li} літію. Для її визначення скористаємося законом збереження імпульсу

$$\vec{p}_p = \vec{p}_{\text{He}} + \vec{p}_{\text{Li}}.$$

Вектори $\vec{p}_p$ і $\vec{p}_{\text{He}}$ за умовою задачі взаємно перпендикулярні і, отже, разом з вектором $\vec{p}_{\text{Li}}$ утворюють прямокутний трикутник. Тому

$$(p_{\text{Li}})^2 = (p_{\text{He}})^2 + (p_p)^2.$$

Виразимо в цій рівності імпульси ядер через їх кінетичні енергії. Оскільки кінетичні енергії ядер за умовою набагато менші від енергій спокою цих ядер, то можна скористатися формулою класичної фізики

$$p^2 = 2mE.$$

Після спрощення отримаємо

$$m_{Li} E_{Li} = m_{He} E_{He} + m_p E_p ,$$

звідки

$$E_{Li} = \frac{m_{He} E_{He} + m_p E_p}{m_{Li}} .$$

Підставивши цей вираз у співвідношення (56), знайдемо

$$Q = \frac{m_{He} E_{He} + m_p E_p}{m_{Li}} + E_{He} - E_H .$$

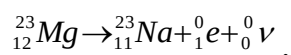
Після підставлення у вираз (60) числових значень величин у MeV та а.о.м., одержимо

$$Q = \frac{4,00260 \cdot 4 + 1,00728 \cdot 5,45}{6,01513} + 4 - 5,45 = 2,13 \text{ MeV}.$$

Відповідь: $Q = 2,13 \text{ MeV}$.

Приклад 26. Радіоактивне ядро магнію $^{23}_{12}\text{Mg}$ викинуло позитрон і нейтрино. Визначити енергію Q_{β^+} - розпаду ядра.

Розв'язання. Реакцію β^+ - розпаду ядра магнію можна записати так:



Припускаючи, що ядро магнію було нерухомим, і враховуючи, що маса спокою нейтрино практично дорівнює нулю, напишемо рівняння

енергетичного балансу. На підставі закону збереження релятивістської повної енергії маємо

$$m_{Mg}c^2 = m_{Na}c^2 + E_{Na} + m_e c^2 + E_e + E_\nu.$$

Енергія розпаду дорівнює

$$Q = E_{Na} + E_e + E_\nu = (m_{Mg} - m_{Na} - m_e)c^2.$$

Виразимо маси ядер магнію і натрію через маси відповідних нейтральних атомів

$$Q = ((m_{Mg} - 12m_e) - (m_{Na} - 11m_e) - m_e)c^2.$$

Оскільки маси спокою електрона і позитрона однакові, то після спрощень співвідношення отримаємо

$$Q = (m_{Mg} - m_{Na} - 2m_e)c^2.$$

Зробивши підставлення числових значень величин у MeV та а.о.м. у цей вираз, знайдемо

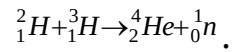
$$Q = (22,99414 - 21,99444 - 2 \cdot 0,00055) \cdot 931,4 = 3,05 \text{ MeV}.$$

Відповідь: $Q = 3,05 \text{ MeV}$.

Приклад 27. Яку масу води, взятої при 0°C , можна закип'ятити, використовуючи енергію термоядерного синтезу гелію з дейтерієм і тритієм,

якщо ККД перетворення енергії дорівнює $\eta = 10\%$? Маса гелію, що утворився, $m = 1$ г.

Розв'язання. Запишемо рівняння ядерної реакції синтезу гелію:



Маса спокою частинок, що утворилися, менша ніж маси спокою частинок, що вступили в реакцію, тому в процесі синтезу ядер виділиться енергія

$$Q_0 = (m_{{}^2_1\text{H}} + m_{{}^3_1\text{H}} - m_{{}^4_2\text{He}} - m_{{}^1_0\text{n}})c^2.$$

При одиничному акті термоядерного синтезу виділяється енергія Q_0 і витрачається маса $m_0 = 5$ а.о.м. $= 5 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг дейтерію і тритію. Отже, використавши паливо масою m , ми вивільнимо енергію

$$Q = Q_0 \frac{m}{m_0}.$$

Вода при цьому отримає кількість теплоти

$$Q_B = \eta Q.$$

Використавши зв'язок між кількістю теплоти і теплоємністю води, можна записати

$$Q_B = c_B m_B \Delta t.$$

Прирівнявши останні співвідношення, отримаємо

$$\eta Q = c_B m_B \Delta t ,$$

звідки

$$m_B = \frac{\eta Q}{c_B \Delta t} .$$

Тоді отримаємо остаточно

$$m_B = \frac{\eta (m_{^2_1H} + m_{^3_1H} - m_{He} - m_n) c^2}{c_B m_0 \Delta t} .$$

Після підставлення числових значень у цей вираз знайдемо

$$m_B = \frac{0,1 \cdot (2,01410 + 3,01605 - 4,00260 - 1,00867) \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2}{4190 \cdot 5 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 100} = 50 \cdot 10^3 \text{ кг} .$$

Це у 50 млн разів більше, ніж маса термоядерного палива, яке було використано на нагрівання!

Відповідь: $m_B = 50 \text{ т}$.

3.2. Таблиця варіантів індивідуального завдання

Номер варіанта	Номер задачі							
1	1.1	1.26	2.1	2.26	3.1	3.26	4.1	4.26
2	1.2	1.27	2.2	2.27	3.2	3.27	4.2	4.27
3	1.3	1.28	2.3	2.28	3.3	3.28	4.3	4.28
4	1.4	1.29	2.4	2.29	3.4	3.29	4.4	4.29
5	1.5	1.30	2.5	2.30	3.5	3.30	4.5	4.30
6	1.6	1.31	2.6	2.31	3.6	3.31	4.6	4.31
7	1.7	1.32	2.7	2.32	3.7	3.32	4.7	4.32
8	1.8	1.33	2.8	2.33	3.8	3.33	4.8	4.33
9	1.9	1.34	2.9	2.34	3.9	3.34	4.9	4.34
10	1.10	1.35	2.10	2.35	3.10	3.35	4.10	4.35
11	1.11	1.36	2.11	2.36	3.11	3.36	4.11	4.36
12	1.12	1.37	2.12	2.37	3.12	3.37	4.12	4.37
13	1.13	1.38	2.13	2.38	3.13	3.38	4.13	4.38
14	1.14	1.39	2.14	2.39	3.14	3.39	4.14	4.39
15	1.15	1.40	2.15	2.40	3.15	3.40	4.15	4.40
16	1.16	1.41	2.16	2.41	3.16	3.41	4.16	4.41
17	1.17	1.42	2.17	2.42	3.17	3.42	4.17	4.42
18	1.18	1.43	2.18	2.43	3.18	3.43	4.18	4.43
19	1.19	1.44	2.19	2.44	3.19	3.44	4.19	4.44
20	1.20	1.45	2.20	2.45	3.20	3.45	4.20	4.45
21	1.21	1.46	2.21	2.46	3.21	3.46	4.21	4.46
22	1.22	1.47	2.22	2.47	3.22	3.47	4.22	4.47
23	1.23	1.48	2.23	2.48	3.23	3.48	4.23	4.48
24	1.24	1.49	2.24	2.49	3.24	3.49	4.24	4.49
25	1.25	1.50	2.25	2.50	3.25	3.50	4.25	4.50

3.3. Задачі для індивідуального завдання

Коливання і хвилі

1.1. Кулька масою $m = 60$ г коливається з періодом $T = 2$ с. У початковий момент часу зміщення кульки складає $x_0 = 4$ см і вона має енергію $E = 0,02$ Дж. Записати рівняння простого гармонічного коливання кульки, закон зміни її прискорення і закон зміни пружної сили з часом.

1.2. На стрижні довжиною $l = 30$ см закріплені два однакових вантажика: один на середині стрижня, інший – на одному з його кінців. Стрижень з вантажиками коливається навколо горизонтальної осі, що проходить через вільний кінець стрижня. Визначити приведену довжину L і період T простих гармонічних коливань даного фізичного маятника. Масою стрижня знехтувати.

1.3. Знайти пружну силу F у момент часу $t = 1$ с і повну енергію E матеріальної точки, яка бере участь у коливаннях, що відбуваються за законом $x = A \cos \omega t$, де $A = 20$ см; $\omega = 2\pi/3$ с⁻¹. Маса матеріальної точки дорівнює $m = 10$ г.

1.4. Точка здійснює прості гармонічні коливання, рівняння яких мають вигляд $x = A \sin \omega t$, де $A = 5$ см, $\omega = 2$ с⁻¹. У момент часу, коли точка мала потенціальну енергію $E_n = 0,1$ мДж, на неї діяла сила $F = 5$ мН. Знайти цей момент часу t .

1.5. Визначити частоту ν простих гармонічних коливань диска радіусом $R = 20$ см навколо горизонтальної осі, що проходить через середину радіуса диска перпендикулярно до його площини.

1.6. Коливання матеріальної точки відбуваються згідно з рівнянням $x = A \cos \omega t$, где $A = 8$ см; $\omega = \pi/6$ с⁻¹. У момент, коли сила пружності вперше

досягла значення $F = 5$ мН, потенціальна енергія точки стала дорівнювати $E_n = 100$ мкДж. Знайти цей момент часу t і відповідну йому фазу ωt .

1.7. До спіральної пружини підвісили вантаж, внаслідок чого пружина розтягнулася на $x = 9$ см. Який буде період T коливань вантажу, якщо його відтягнути вниз і потім відпустити?

1.8. Визначити період T простих гармонічних коливань диска радіусом $R = 40$ см навколо горизонтальної осі, що проходить через точку на ободі диска.

1.9. Визначити період T коливань математичного маятника, якщо модуль його максимального відхилення $A = 18$ см і максимальна швидкість $v_{max} = 16$ см/с.

1.10. Матеріальна точка здійснює прості гармонічні коливання так, що в початковий момент часу зміщення становить $x_0 = 4$ см, а швидкість $v_0 = 10$ см/с. Визначити амплітуду A і початкову фазу φ_0 коливань, якщо їх період становить $T = 2$ с.

1.11. Математичний маятник довжиною $l = 1$ м встановлений у ліфті. Ліфт підіймається з прискоренням $a = 2,5$ м/с². Визначити період T коливань маятника.

1.12. Точка виконує коливання за законом $x = A \cos \omega t$, де $A = 5$ см; $\omega = 2$ с⁻¹. Визначити прискорення $|a|$ точки у момент часу, коли її швидкість $v = 8$ см/с.

1.13. Тонкий обруч, повішений на цвях, вбитий горизонтально в стіну, коливається в площині, паралельній стіні. Радіус обруча дорівнює $R = 30$ см. Обчислити період T коливань обруча.

1.14. Амплітуда згасаючих коливань маятника за час $t_1 = 5$ хв зменшилася вдвічі. За який час t_2 від початкового моменту амплітуда зменшиться у вісім разів?

1.15. За час $t = 8$ хв амплітуда згасаючих коливань маятника зменшилася у три рази. Визначити коефіцієнт загасання β .

1.16. Амплітуда коливань маятника довжиною $l = 1$ м за час $t = 10$ хв зменшилася вдвічі. Визначити логарифмічний декремент згасання коливань λ .

1.17. Логарифмічний декремент згасання коливань маятника дорівнює $\lambda = 0,003$. Визначити кількість N повних коливань, які повинен здійснити маятник, щоб амплітуда зменшилася вдвічі.

1.18. Гиря масою $m = 500$ г підвішена до спіральної пружини жорсткістю $k = 20$ Н/м і здійснює пружні коливання в середовищі з тертям. Логарифмічний декремент згасання коливань $\lambda = 0,004$. Визначити кількість N повних коливань, які повинна здійснити гиря, щоб амплітуда коливань зменшилася в $n = 2$ рази. За який час t відбудеться це зменшення?

1.19. Тіло масою $m = 5$ г здійснює згасаючі коливання. За час $t = 50$ с воно втратило 60% своєї енергії. Визначити коефіцієнт опору r .

1.20. Визначити період T згасаючих коливань, якщо період власних коливань системи дорівнює $T_0 = 1$ с, логарифмічний декремент згасання коливань $\lambda = 0,628$.

1.21. Знайти кількість N повних коливань системи, протягом яких енергія системи зменшилася в $n = 2$ рази. Логарифмічний декремент згасання коливань $\lambda = 0,01$.

1.22. Куля масою $m = 0,5$ кг підвішена на пружині, жорсткість якої $k = 32$ Н/м, і здійснює згасаючі коливання. Визначити їх період у двох випадках: 1) коли за час, протягом якого відбулося $N_1 = 88$ коливань, амплітуда зменшилася в $n_1 = 2$ рази; 2) коли за час двох коливань ($N_2 = 2$) амплітуда зменшилася в $n_2 = 20$ разів.

1.23. При спостереженні згасаючих коливань виявилось, що для двох послідовних коливань амплітуда другого менша за амплітуду першого на 0,6 см. Період згасаючих коливань $T = 0,5$ с. Визначити: коефіцієнт згасання і частоту згасаючих коливань.

1.24. Тіло масою $m = 100$ г, здійснюючи згасаючі коливання, за $\tau = 1$ хв втратило 40% своїй енергії. Визначити коефіцієнт опору r .

1.25. Коливальний контур складається з котушки індуктивністю $L = 10$ мГн, конденсатора електроємністю $C = 0,1$ мкФ і резистора опором $R = 20$ Ом. Визначити кількість повних коливань, що здійснюються за час зменшення амплітуди струму в контурі в e разів.

1.26. У незгасаючій біжучій хвилі задана точка М на відстані $x = \frac{\lambda}{12}$ від джерела коливань у напрямку поширення хвилі. Амплітуда коливань $A = 0,05$ м. Вважаючи в початковий момент часу зміщення точки Р, що знаходиться в джерелі, максимальним, визначити зміщення від положення рівноваги точки М для моменту $t = \frac{T}{6}$, а також різницю фаз коливань точок М і Р. T – період коливань.

1.27. Плоска хвиля поширюється вздовж осі x у середовищі, яке не поглинає енергію, зі швидкістю $v = 15$ м/с. Дві точки, що знаходяться на цій прямій на відстанях $l_1 = 5$ м і $l_2 = 5,5$ м від джерела хвиль, коливаються з різницею фаз $\Delta\varphi = \frac{\pi}{5}$. Амплітуда хвилі $A = 0,04$ м. Визначити: довжину хвилі; зміщення першої точки в момент часу $t = 3$ с.

1.28. Хвиля поширюється в пружному середовищі зі швидкістю $v = 150$ м/с. Визначити частоту коливань, якщо мінімальна відстань між точками середовища, фази коливань яких протилежні, дорівнює $l = 0,75$ м.

1.29. Хвилі поширюються зі швидкістю $v = 400$ м/с при частоті коливань $\nu = 500$ Гц. Чому дорівнює різниця фаз двох точок, які знаходяться на відстані $\Delta x = 0,2$ м одна від одної?

1.30. Хвиля поширюється вздовж шнура зі швидкістю $v = 10$ м/с і має довжину $\lambda = 20$ м. Найбільше відхилення точок шнура $0,02$ м. Знайти фазу коливань, зміщення і швидкість точки, яка знаходиться на відстані $L = 48,3$ м від джерела хвилі в момент часу $t = 5$ с.

1.31. Звукові коливання з частотою $\nu = 450$ Гц і амплітудою $A = 0,003$ м поширюються у пружному середовищі. Довжина хвилі $\lambda = 0,8$ м. Визначити: швидкість поширення хвиль; максимальну швидкість частинок середовища.

1.32. Людське вухо може сприймати звуки, які відповідають граничним частотам 16 Гц і 20000 Гц. Знайти область сприймання звукових хвиль, якщо швидкість поширення звуку в повітрі $v = 343$ м/с.

1.33. Знайти швидкість звуку в матеріалі, модуль Юнга якого дорівнює $E = 0,24$ ГПа, а густина $\rho = 1240$ кг/м³.

1.34. Визначити різницю фаз $\Delta\phi$ коливань двох точок, що лежать на промені і знаходяться одна від одної на відстані $\Delta l = 1$ м, якщо довжина хвилі $\lambda = 0,5$ м.

1.35. Дві точки лежать на промені і знаходяться від джерела коливань на відстанях $x_1 = 4$ м і $x_2 = 7$ м. Період коливань $T = 20$ мс і швидкість поширення хвилі $v = 300$ м/с. Визначити різницю фаз коливань цих точок.

1.36. Хвиля поширюється в пружному середовищі із швидкістю $v = 150$ м/с. Визначити частоту ν коливань, якщо мінімальна відстань між точками середовища, фази коливань яких протилежні, дорівнює $\Delta x = 0,75$ м.

1.37. Звукові коливання з частотою $\nu = 450$ Гц і амплітудою $A = 0,3$ мм поширюються у пружному середовищі. Довжина хвилі $\lambda = 80$ см.

Визначити: 1) швидкість поширення хвиль; 2) максимальну швидкість частинок середовища.

1.38. Плоска синусоїдальна хвиля поширюється вздовж осі x у середовищі, що не поглинає енергію, із швидкістю $v = 10$ м/с. Дві точки, що знаходяться на цій прямій на відстанях $x_1 = 7$ м і $x_2 = 10$ м від джерела коливань, коливаються з різницею фаз $\Delta\varphi = 3\pi/5$. Амплітуда хвилі $A = 5$ см. Визначити: 1) довжину хвилі λ ; 2) рівняння хвилі; 3) зміщення ξ_2 другої точки у момент часу $t = 2$ с.

1.39. Поперечна хвиля поширюється вздовж пружного шнура із швидкістю $v = 10$ м/с. Амплітуда коливань точок шнура $A = 5$ см, а період коливань $T = 1$ с. Записати рівняння хвилі і визначити: 1) довжину хвилі; 2) фазу коливань, зміщення, швидкість і прискорення точки, розміщеної на відстані $x = 9$ м від джерела коливань у момент часу $t = 2,5$ с.

1.40. Швидкість поширення електромагнітних хвиль в деякому середовищі складає $v = 250$ Мм/с. Визначити довжину електромагнітних хвиль в цьому середовищі, якщо їх частота у вакуумі $\nu_0 = 1$ МГц.

1.41. Для демонстрації заломлення електромагнітних хвиль Герц застосовував призму, виготовлену з парафіну. Визначити показник заломлення парафіну, якщо його діелектрична проникність $\varepsilon = 2$ і магнітна проникність $\mu = 1$.

1.42. Електромагнітна хвиля з частотою $\nu = 5$ МГц переходить з немагнітного середовища з діелектричною проникністю $\varepsilon = 2$, у вакуум. Визначити приріст її довжини хвилі.

1.43. Коливальний контур містить конденсатор електроємністю $C = 0,5$ нФ і котушку індуктивністю $L = 0,4$ мГн. Визначити довжину хвилі випромінювання, що генерується контуром.

1.44. Визначити довжину електромагнітної хвилі у вакуумі, на яку настроєний коливальний контур, якщо максимальний заряд на обкладках

конденсатора $Q_{max} = 50$ нКл, а максимальний струм у контурі $I_{max} = 1,5$ А. Активним опором контуру знехтувати.

1.45. Довжина електромагнітної хвилі у вакуумі, на яку настроєний коливальний контур, дорівнює $\lambda = 12$ м. Нехтуючи активним опором контуру, визначити максимальний заряд Q_{max} на обкладках конденсатора, якщо максимальний струм у контурі $I_{max} = 1$ А.

1.46. Два когерентні джерела коливаються в однакових фазах з частотою $\nu = 400$ Гц. Швидкість поширення коливань в середовищі $v = 1$ км/с. Визначити, при якій найменшій різниці ходу, що не дорівнює нулю, спостерігатиметься: 1) максимальне посилення коливань; 2) максимальне ослаблення коливань.

1.47. Два когерентні джерела збуджують поперечні хвилі в однакових фазах. Періоди коливань $T = 0,2$ с, швидкість поширення хвиль в середовищі $v = 800$ м/с. Визначити, при якій різниці ходу у разі накладання хвиль спостерігатиметься: 1) ослаблення коливань; 2) посилення коливань.

1.48. Два динаміки розміщені на відстані $d = 0,5$ м один від одного і відтворюють один і той же музичний тон на частоті $\nu = 1500$ Гц. Приймач знаходиться на відстані $l = 4$ м від центра динаміків. Вважаючи швидкість звуку такою, що дорівнює $v = 340$ м/с, визначити, на яку відстань від центральної лінії паралельно динамікам треба відсунути приймач, щоб він зафіксував перший інтерференційний мінімум.

1.49. Два динаміки розміщені на відстані $d = 2,5$ м один від одного і відтворюють один і той же музичний тон на певній частоті, який реєструється приймачем, що знаходиться на відстані $l = 3,5$ м від центра динаміків. Якщо приймач пересунути від центральної лінії паралельно динамікам на відстань $x = 1,55$ м, то він фіксує перший

інтерференційний мінімум. Швидкість звуку $v = 340$ м/с. Визначити частоту звуку.

1.50. Мікрохвильовий генератор випромінює вздовж осі x плоскі електромагнітні хвилі, які потім відбиваються назад. Точки M_1 і M_2 відповідають положенням двох сусідніх мінімумів інтенсивності і віддалені одна від одної на відстані $l = 5$ см. Визначити частоту мікрохвильового генератора.

Хвильова і квантова оптика

2.1. На тонку плівку у напрямі нормалі до її поверхні падає монохроматичне світло з довжиною хвилі $\lambda = 500$ нм. Відбите від неї світло максимально посилене внаслідок інтерференції. Визначити мінімальну товщину d_{min} плівки, якщо показник заломлення матеріалу плівки складає $n = 1,4$.

2.2. Між скляною пластинкою і плоско-опуклою лінзою, що лежить на ній, знаходиться рідина. Знайти показник заломлення рідини, якщо радіус третього темного кільця Ньютона при спостереженні у відбитому світлі з довжиною хвилі $\lambda = 0,6$ мкм дорівнює $r_3 = 0,82$ мм. Радіус кривини лінзи $R = 0,5$ м.

2.3. Відстань від щілин до екрана в досліді Юнга дорівнює $L = 1$ м. Визначити відстань між щілинами, якщо на відрізку довжиною $l = 1$ см укладається $N = 10$ темних інтерференційних смуг. Довжина хвилі $\lambda = 0,7$ мкм.

2.4. На скляну пластину встановлена опуклою стороною плоско-опукла лінза. Зверху лінза освітлена монохроматичним світлом довжиною хвилі $\lambda = 500$ нм. Знайти радіус R лінзи, якщо радіус четвертого темного кільця Ньютона у відбитому світлі становить $r_4 = 2$ мм.

2.5. На тонку гліцеринову плівку товщиною $d = 1,5$ мкм нормально до її поверхні падає біле світло. Визначити довжини хвиль λ світла видимої

ділянки спектра ($0,4 \leq \lambda \leq 0,8$ мкм), яке буде ослаблене в результаті інтерференції.

2.6. На скляну пластину нанесений тонкий шар прозорої речовини з показником заломлення $n = 1,3$. Пластинка освітлена паралельним пучком монохроматичного світла з довжиною хвилі $\lambda = 640$ нм, що падає на пластинку нормально. Яку мінімальну товщину d_{min} повинен мати шар, щоб для відбитого пучка виконувалася умова інтерференційного мінімуму.

2.7. На тонкий скляний клин падає нормально паралельний пучок світла з довжиною хвилі $\lambda = 500$ нм. Відстань між сусідніми темними інтерференційними смугами у відбитому світлі складає $b = 0,5$ мм. Визначити кут α між поверхнями клину. Показник заломлення скла, з якого виготовлений клин, $n = 1,6$.

2.8. Плоско-опукла скляна лінза з фокусною відстанню $f = 1$ м лежить опуклою стороною на скляній пластинці. Радіус п'ятого темного кільця Ньютона у відбитому світлі складає $r_5 = 1,1$ мм. Визначити довжину світлової хвилі λ .

2.9. Між двома плоскопаралельними пластинами на відстані $L = 10$ см від межі їх стикання знаходиться дріт діаметром $d = 0,01$ мм, у результаті утворюється повітряний клин. Пластини освітлюються нормально падаючим монохроматичним світлом ($\lambda = 0,6$ мкм). Визначити ширину b інтерференційних смуг, що спостерігаються у відбитому світлі.

2.10. У досліді Юнга відстань між щілинами $d = 1$ мм, а відстань від щілин до екрана $L = 3$ м. Визначити: 1) положення першої світлої смуги; 2) положення третьої темної смуги, якщо щілини освітлювати монохроматичним світлом з довжиною хвилі $\lambda = 0,5$ мкм.

2.11. У досліді Юнга відстань від щілин до екрана дорівнює $L = 3$ м. Визначити кутову відстань між сусідніми світлими смугами, якщо третя

світла смуга на екрані знаходиться на відстані $L = 4,5$ мм від центра інтерференційної картини.

2.12. Якщо в досліді Юнга на шляху одного з променів, що інтерферують, помістити перпендикулярно до нього тонку скляну пластинку ($n = 1,5$), то центральна світла смуга зміщується в положення, яке спочатку займала п'ята світла смуга. Довжина хвилі $\lambda = 0,5$ мкм. Визначити товщину пластинки.

2.13. Відстані від біпризми Френеля до вузької щілини і екрана відповідно дорівнюють $a = 48$ см і $L = 6$ м. Біпризма скляна ($n = 1,5$) із заломлювальним кутом $\alpha = 10'$. Визначити максимальну кількість смуг, що можна спостерігати на екрані, якщо $\lambda = 600$ нм.

2.14. На плоскопаралельну плівку з показником заломлення $n = 1,33$ під кутом $\alpha = 45^\circ$ падає паралельний пучок білого світла. Визначити, при якій найменшій товщині плівки дзеркально відбите світло найсильніше забарвиться в жовтий колір ($\lambda = 0,6$ мкм).

2.15. Монохроматичне світло падає нормально на поверхню повітряного клину, причому відстань між інтерференційними смугами $\Delta l_1 = 0,4$ мм. Визначити відстань Δl_2 між інтерференційними смугами, якщо простір між пластинками, що створюють клин, заповнити прозорою рідиною з показником заломлення $n = 1,33$.

2.16. Установка для спостереження кілець Ньютона освітлюється нормально падаючим монохроматичним світлом ($\lambda = 590$ нм). Визначити товщину d повітряного проміжку в тому місці, де у відбитому світлі спостерігається третє світле кільце.

2.17. Установка для спостереження кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом з довжиною хвилі $\lambda = 0,6$ мкм, що падає нормально до поверхні. Простір між лінзою і скляною пластинкою заповнений рідиною, і спостереження ведеться в світлі, що проходить.

Радіус кривини лінзи $R = 4$ м. Визначити показник заломлення рідини, якщо радіус другого світлого кільця $r_2 = 1,8$ мм.

2.18. Установка для спостереження кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом з довжиною хвилі $\lambda = 0,55$ мкм, що падає нормально. Визначити товщину повітряного зазору, утвореного плоскопаралельною пластинкою і дотичною до неї плоско-опуклою лінзою в тому місці, де у відбитому світлі спостерігається четверте темне кільце.

2.19. Плоско-опукла лінза з радіусом сферичної поверхні $R = 12,5$ см лежить на скляній пластині. Діаметри десятого і п'ятнадцятого темних кілець Ньютона у відбитому світлі відповідно дорівнюють 1 мм і 1,5 мм. Визначити довжину хвилі світла.

2.20. Яку найменшу кількість N_{min} штрихів повинні мати дифракційні ґрати, щоб у спектрі другого порядку можна було бачити роздільно дві жовті лінії натрію з довжинами хвиль $\lambda_1 = 589,0$ нм і $\lambda_2 = 589,6$ нм?

2.21. На поверхню дифракційних ґрат нормально до їх поверхні падає монохроматичне світло. Стала дифракційних ґрат в $n = 4,6$ разів більше довжини світлової хвилі. Знайти загальну кількість M дифракційних максимумів, які теоретично можливо спостерігати у даному випадку.

2.22. На дифракційні ґрати падає нормально паралельний пучок білого світла. Спектри третього і четвертого порядку частково накладаються один на одного. На яку довжину хвилі в спектрі четвертого порядку накладається червона межа ($\lambda_{\text{ч}} = 780$ нм) спектра третього порядку?

2.23. На дифракційні ґрати, що мають $n = 600$ штрихів на міліметр, падає нормально біле світло. Спектр проектується розміщеною поблизу ґрат лінзою на екран. Визначити довжину l спектра першого порядку на екрані, якщо відстань від лінзи до екрана $L = 1,2$ м. Межі видимого спектра: $\lambda_{\text{чер}} = 780$ нм та $\lambda_{\text{фіол}} = 400$ нм.

2.24. На грань кристала кам'яної солі падає паралельний пучок рентгенівського випромінювання. Відстань між атомними площинами дорівнює $d = 280$ пм. Під кутом $\varphi = 65^\circ$ до атомної площини спостерігається дифракційний максимум першого порядку. Визначити довжину хвилі λ рентгенівського випромінювання.

2.25. На дифракційні ґрати, що мають $n = 100$ штрихів на 1 мм, нормально падає монохроматичне світло. Зорова труба спектрометра наведена на максимум другого порядку. Щоб навести трубу на інший максимум того ж порядку, її потрібно повернути на кут $\Delta\varphi = 16^\circ$. Визначити довжину хвилі λ світла, що падає на ґрати.

2.26. На дифракційні ґрати падає нормально монохроматичне світло ($\lambda = 410$ нм). Кут між напрямками на максимумах першого і другого порядків дорівнює $\Delta\varphi = 2^\circ 21'$. Визначити кількість n штрихів на 1 мм дифракційних ґрат.

2.27. Стала дифракційних ґрат в $n = 4$ рази більша за довжину світлової хвилі монохроматичного світла, що нормально падає на їх поверхню. Визначити кут φ між двома першими симетричними дифракційними максимумами.

2.28. Відстань між штрихами дифракційних ґрат $d = 4$ мкм. На ґрати падає нормально світло з довжиною хвилі $\lambda = 0,58$ мкм. Максимум якого найбільшого порядку дають ці ґрати?

2.29. Дифракційні ґрати мають $n = 200$ штрихів на 1 мм. На ґрати падає нормально монохроматичне світло ($\lambda = 0,6$ мкм). Максимум якого найбільшого порядку дають ці ґрати?

2.30. На дифракційні ґрати, що мають $n = 400$ штрихів на 1 мм, падає нормально монохроматичне світло ($\lambda = 0,6$ мкм). Знайти загальну кількість дифракційних максимумів, які дають ці ґрати. Визначити кут φ дифракції, що відповідає останньому максимуму.

2.31. Визначити число штрихів на 1 мм дифракційних ґрат, якщо максимум четвертого порядку для монохроматичного світла з довжиною хвилі $\lambda = 0,5$ мкм спостерігається під кутом $\varphi = 30^\circ$.

2.32. На дифракційні ґрати нормально падає монохроматичне світло з довжиною хвилі $\lambda = 0,5$ мкм. На екран, що знаходиться від ґрат на відстані $L = 1$ м, за допомогою лінзи, розміщеної поблизу ґрат, проектується дифракційна картина, причому перший головний максимум спостерігається на відстані $l = 15$ см від центрального. Визначити число штрихів на 1 см дифракційних ґрат.

2.33. На дифракційні ґрати нормально падає монохроматичне світло. Визначити кут дифракції для лінії $\lambda_4 = 0,55$ мкм в четвертому порядку, якщо цей кут для лінії $\lambda_3 = 0,6$ мкм в третьому порядку складає $\varphi_3 = 30^\circ$.

2.34. На дифракційні ґрати нормально падає монохроматичне світло. У спектрі, одержаному за допомогою цих ґрат, деяка спектральна лінія спостерігається в першому порядку під кутом $\varphi = 11^\circ$. Визначити найвищий порядок спектра, в якому може спостерігатися ця лінія.

2.35. Пучок світла, що розповсюджується в повітрі, падає на поверхню рідини під кутом $\alpha = 54^\circ$. Визначити кут заломлення β пучка, якщо відбитий пучок повністю поляризований.

2.36. На якій кутовій висоті φ над горизонтом повинно знаходитися Сонце, щоб його світло, відбите від поверхні води, було повністю поляризоване?

2.37. Ступінь поляризації частково поляризованого світла дорівнює $P = 0,5$. У скільки разів відрізняється максимальна інтенсивність світла, що проходить через аналізатор, від мінімальної?

2.38. Пучок природного світла, що розповсюджується у воді, відбивається від межі алмаза, зануреного у воду. При якому куті падіння α_B світло, що відбивається, повністю поляризоване?

2.39. Кут Брюстера при падінні світла з повітря на кристал кам'яної солі дорівнює $\alpha_B = 57^\circ$. Визначити швидкість світла в цьому кристалі.

2.40. Пластинку кварцу товщиною $d = 2$ мм помістили між паралельними ніколями, внаслідок чого площина поляризації монохроматичного світла повернулася на кут $\alpha = 53^\circ$. Яку найменшу товщину d_{min} повинна мати пластинка, щоб поле зору поляриметра стало абсолютно темним?

2.41. Граничний кут повного відбивання пучка світла на межі рідини з повітрям дорівнює $\alpha = 43^\circ$. Визначити кут Брюстера α_B для падіння променю з повітря на поверхню цієї рідини.

2.42. Паралельний пучок світла переходить з гліцерину в скло так, що пучок, відбитий від межі розділу цих середовищ, виявляється максимально поляризованим. Визначити кут γ між падаючим і заломленим пучками.

2.43. Кварцову пластинку помістили між схрещеними ніколями. При якій найменшій товщині d_{min} кварцової пластини поле зору ніколя буде максимально освітлене? Стала обертання кварцу дорівнює $\alpha = 27$ град/мм.

2.44. При проходженні світла через трубку довжиною $l_1 = 20$ см, що містить розчин цукру концентрацією $C_1 = 10\%$, площина поляризації світла повернулася на кут $\alpha_1 = 13,3^\circ$. В іншому розчині цукру, що налитий у трубку довжиною $l_2 = 15$ см, площина поляризації повернулася на кут $\alpha_2 = 5,2^\circ$. Визначити концентрацію C_2 другого розчину.

2.45. Кут падіння променю на поверхню скла дорівнює $\alpha = 60^\circ$. При цьому відбитий пучок світла виявився максимально поляризованим. Визначити кут β заломлення променю.

2.46. Кут між площинами пропускання поляроїдів дорівнює $\alpha = 50^\circ$. Природне світло, проходячи через таку систему, ослаблюється в $n = 8$ разів.

Нехтуючи втратою світла при відбиванні, визначити коефіцієнт поглинання k світла в поляроїдах.

2.47. Аналізатор у $k = 2$ рази зменшує інтенсивність світла, що надходить до нього від поляризатора. Визначити кут α між площинами пропускання поляризатора і аналізатора. Втратами інтенсивності світла в аналізаторі знехтувати.

2.48. Пучок світла, що розповсюджується у скляній посудині з гліцерином, відбивається від дна посудини. При якому куті α падіння відбитий пучок світла максимально поляризований?

2.49. Кут між площинами пропускання поляризатора і аналізатора дорівнює $\alpha = 45^\circ$. У скільки разів зменшиться інтенсивність світла, що виходить з аналізатора, якщо кут збільшити до 60° ?

2.50. Пучок світла переходить з рідини у скло. Кут падіння пучка дорівнює $\alpha_1 = 60^\circ$, кут заломлення $\beta = 50^\circ$. При якому куті падіння пучок світла, що відбитий від межі розділу цих середовищ, буде максимально поляризований?

Елементи квантової механіки. Будова атому

3.1. Чорне тіло має температуру $T_1 = 500$ К. Якою буде температура T_2 тіла, якщо в результаті нагрівання енергетична світність тіла збільшиться в $n = 5$ разів?

3.2. Температура абсолютно чорного тіла $T = 2000$ К. Визначити довжину хвилі $\lambda_{\max}$, на яку припадає максимум енергії випромінювання, і випромінювальну здатність $(r_{\lambda,T})_{\max}$ для цієї довжини хвилі.

3.3. Визначити температуру T і енергетичну світність абсолютно чорного тіла, якщо максимум енергії випромінювання припадає на довжину хвилі $\lambda_{\max} = 600$ нм.

3.4. З вікна печі випромінюється потік $\Phi_e = 4$ кДж/хв. Визначити температуру T печі, якщо площа вікна дорівнює $S = 8$ см².

3.5. Потік випромінювання абсолютно чорного тіла $\Phi_e = 10$ кВт. Максимум енергії випромінювання припадає на довжину хвилі $\lambda_{max} = 0,8$ мкм. Визначити площу S випромінювальної поверхні.

3.6. Максимум випромінювальної здатності Сонця припадає на довжину хвилі $\lambda_{max} = 0,48$ мкм. Вважаючи, що Сонце випромінює, як чорне тіло, визначити: 1) температуру його поверхні; 2) потужність, що випромінюється поверхнею.

3.7. Муфельна піч, яка споживає потужність $N = 1$ кВт, має отвір площею $S = 100$ см². Визначити частку ω потужності, що розсіюється стінками печі, якщо температура її внутрішньої поверхні дорівнює $T = 1000$ К.

3.8. Середня енергетична світність поверхні Землі дорівнює $R_e = 0,54$ Дж/(см²·хв). Якою має бути температура T поверхні Землі, якщо умовно вважати, що вона випромінює як сіре тіло з коефіцієнтом чорноти $\alpha_T = 0,25$?

3.9. Знайти температуру печі, якщо відомо, що з отвору в ній розміром $S = 6,1$ см² за час $t = 1$ с випромінюється $E = 35$ Дж енергії. Випромінювання вважати близьким до випромінювання абсолютно чорного тіла.

3.10. Яку кількість енергії випромінює один квадратний сантиметр свинцю при температурі плавлення за $t = 1$ с? Відношення енергетичних світностей поверхні свинцю та абсолютно чорного тіла для цієї температури вважати таким, що дорівнює 0,6.

3.11. Потужність випромінювання абсолютно чорного тіла дорівнює $N = 34$ кВт. Знайти температуру цього тіла, якщо відомо, що поверхня його дорівнює $S = 0,6$ м².

3.12. Розжарена металева поверхня площею $S = 10 \text{ см}^2$ випромінює за одну хвилину $E = 4 \cdot 10^4$ Дж енергії. Температура поверхні дорівнює $T = 2500$ К. Знайти: 1) яке було б випромінювання цієї поверхні, якби вона була абсолютно чорною; 2) яке відношення енергетичних світностей цієї поверхні і абсолютно чорного тіла при даній температурі.

3.13. Діаметр вольфрамової спіралі в електричній лампочці дорівнює $d = 0,3$ мм, довжина спіралі $l = 5$ см. При включенні лампочки у коло з напругою $U = 127$ В через неї проходить струм $I = 0,31$ А. Знайти температуру спіралі лампочки. Вважати, що при рівновазі все тепло, що виділяється в нитці, йде на випромінювання. Відношення енергетичних світностей вольфраму та абсолютно чорного тіла вважати для цієї температури таким, що дорівнює 0,31.

3.14. Червона межа фотоефекту для цинку $\lambda_0 = 310$ нм. Визначити максимальну кінетичну енергію $E_{\max}$ фотоелектронів в електрон-вольтах, якщо на цинк падає світло з довжиною хвилі $\lambda = 200$ нм.

3.15. На поверхню калію падає світло з довжиною хвилі $\lambda = 150$ нм. Визначити максимальну кінетичну енергію $E_{\max}$ фотоелектронів.

3.16. Фотони з енергією $E = 5$ еВ виривають електрони з металу з роботою виходу $A = 4,7$ еВ. Визначити максимальний імпульс p , отриманий пластиною. Вважати, що напрями руху фотона і фотоелектрона лежать на одній прямій, перпендикулярній до поверхні пластини.

3.17. На фотоелемент з катодом із літію падає світло з довжиною хвилі $\lambda = 200$ нм. Знайти найменше значення затримуючої різниці потенціалів U_z фотоелемента.

3.18. Якою має бути довжина хвилі γ - випромінювання, що падає на платинову пластину, щоб максимальна швидкість фотоелектронів була $v_{\max} = 3 \text{ Мм/с}$?

3.19. На металічну пластину падає пучок ультрафіолетового випромінювання ($\lambda = 0,25$ мкм). Фотострум припиняється при мінімальній затримуючій різниці потенціалів $U_s = 0,96$ В. Визначити роботу виходу A електронів із металу.

3.20. На поверхню металу падає монохроматичне світло з довжиною хвилі $\lambda = 0,1$ мкм. Червона межа фотоефекту $\lambda_0 = 0,3$ мкм. Яка частка енергії фотона витрачається на надання електрону кінетичної енергії?

3.21. На метал падає рентгенівське випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 1$ нм. Нехтуючи роботою виходу, визначити максимальну швидкість v_{max} фотоелектронів.

3.22. Визначити, до якого потенціалу зарядиться ізольована срібна кулька при опроміненні її ультрафіолетовим світлом з довжиною хвилі $\lambda = 208$ нм. Робота виходу електронів із срібла $A = 4,7$ еВ.

3.23. На цинкову пластину падає монохроматичний пучок світла. Фотострум припиняється при затримуючій різниці потенціалів $U_s = 1,5$ В. Визначити довжину хвилі λ світла, що падає на пластину.

3.24. Знайти масу фотона: 1) червоних променів світла ($\lambda = 7 \cdot 10^{-5}$ см), 2) рентгенівських променів ($\lambda = 25$ пм) і 3) γ -променів ($\lambda = 1,24$ пм).

3.25. Визначити енергію, масу і імпульс фотона, якщо його довжина хвилі дорівнює $\lambda = 1,6$ пм.

3.26. З якою швидкістю має рухатись електрон, щоб його кінетична енергія дорівнювала енергії фотона з довжиною хвилі $\lambda = 520$ нм?

3.27. Знайти масу фотона, імпульс якого дорівнює імпульсу молекули водню при температурі $t = 20^\circ\text{C}$. Швидкість молекули вважати рівною середній квадратичній швидкості.

3.28. Фотон при ефекті Комптона на вільному електроні був розсіяний на кут $\theta = \pi/2$. Визначити імпульс p (у MeV/c), отриманий електроном, якщо енергія фотона до розсіювання була $E_1 = 1,02$ MeV.

3.29. Рентгенівське випромінювання ($\lambda = 1$ нм) розсіюється електронами, які можна вважати практично вільними. Визначити максимальну довжину хвилі λ_{max} рентгенівського випромінювання в розсіяному пучку.

3.30. Яка частка енергії фотона припадає при ефекті Комптона на електрон віддачі, якщо розсіювання фотона відбувається на кут $\theta = \pi/2$? Енергія фотона до розсіювання $E_1 = 0,51$ MeV.

3.31. Фотон з довжиною хвилі $\lambda_1 = 15$ пм розсіявся на вільному електроні. Довжина хвилі розсіяного фотона $\lambda_2 = 16$ пм. Визначити кут розсіювання.

3.32. Фотон з енергією $E_1 = 0,51$ MeV був розсіяний при ефекті Комптона на вільному електроні на кут $\theta = 180^\circ$. Визначити кінетичну енергію E_k електрона віддачі.

3.33. У результаті ефекту Комптона фотон з енергією $E_1 = 1,02$ MeV був розсіяний на вільних електронах на кут $\theta = 150^\circ$. Визначити енергію E_2 розсіяного фотона.

3.34. Визначити кут θ , на який був розсіяний квант з енергією $E_1 = 1,53$ MeV при ефекті Комптона, якщо кінетична енергія електрона віддачі $E_k = 0,51$ MeV.

3.35. Фотон з енергією $E_1 = 0,51$ MeV при розсіюванні на вільному електроні втратив половину своєї енергії. Визначити кут розсіювання θ .

3.36. Фотон з енергією $E = 1,025$ MeV розсіявся на вільному електроні, що спочатку перебував у стані спокою. Визначити кут розсіювання фотона,

якщо довжина хвилі розсіяного фотона виявилася такою, що дорівнює комптонівській довжині хвилі $\lambda_C = 2,43$ пм.

3.37. Визначити довжини хвиль де Бройля електрона, що рухається зі швидкістю $v = 1$ Мм/с, атома водню, що рухається зі швидкістю, яка дорівнює середній квадратичній швидкості при температурі $t = 27^\circ\text{C}$, і кульки масою $m = 1$ г, що рухається зі швидкістю $v = 0,1$ м/с.

3.38. Отримати вираз для дебройлівської довжини хвилі λ релятивістської частинки маси m ; 1) через її швидкість v ; 2) через кінетичну енергію E_k .

3.39. Знайти довжину хвилі де Бройля електрона, що рухається зі швидкістю $v = 20$ км/с. До якої області електромагнітного спектра можна віднести довжину хвилі, що дорівнює знайдений?

3.40. У телевізійній трубці проекційного типу електрони розганяються до швидкості $v = 10^8$ м/с. Визначити довжину хвилі електронів без урахування і з урахуванням залежності маси від швидкості.

3.41. На фотографії, отриманій за допомогою камери Вільсона, ширина сліду електрона складає $a = 0,8 \cdot 10^{-3}$ м. Знайти невизначеність вимірювання його швидкості.

3.42. Середня кінетична енергія електрона в основному стані атома водню дорівнює $E_k = 13,6$ еВ. Використовуючи співвідношення невизначеностей, знайти найменшу похибку, з якою можна обчислити координату електрона в атомі.

3.43. Електрон, що рухається зі швидкістю $v = 8 \cdot 10^6$ м/с, реєструється бульбашковою камерою. Використовуючи співвідношення невизначеностей, знайти похибку у вимірюванні швидкості електрона, якщо діаметр бульбашки, що утворився у камері, 1 мкм.

3.44. Оцінити за допомогою співвідношення невизначеностей мінімальну кінетичну енергію електрона, що рухається всередині сфери радіусом $R = 0,05$ нм.

3.45. Атом випромінює фотон з довжиною хвилі $\lambda = 0,550$ мкм. Тривалість випромінювання $\tau = 10$ нс. Визначити найменшу похибку, з якою може бути виміряна довжина хвилі випромінювання.

3.46. Під час руху частинки вздовж осі x її швидкість визначена з точністю до $\Delta v = 2,3$ см/с. Оцінити невизначеність координати Δx : 1) для електрона; 2) для броунівської частинки маси $m \sim 10^{-13}$ г; 3) для дробинки масою $m \sim 0,1$ г.

3.47. До електродів рентгенівської трубки прикладена різниця потенціалів $U = 60$ кВ. Найменша довжина хвилі рентгенівських променів в ній дорівнює $\lambda = 0,0206$ нм. Знайти з цих даних сталу Планка.

3.48. Знайти короткохвильову межу суцільного рентгенівського спектра для випадків, коли до рентгенівської трубки прикладена різниця потенціалів: 1) 40 кВ; 2) 50 кВ.

3.49. У спектрі атомарного водню інтервал між першими двома лініями, що належать до серії Бальмера, складає $\Delta\lambda = 1,71 \cdot 10^{-7}$ м. Визначити за цими даними сталу Рідберга.

3.50. Знайти найменшу і найбільшу довжини хвиль спектральних ліній водню у видимій області спектра.

Будова атомних ядер. Радіоактивність

4.1. Визначити, у скільки разів початкова кількість ядер радіоактивного ізотопу зменшиться за три роки, якщо за один рік вона зменшилася в 4 рази.

4.2. Визначити у відсотках, яка частина початкової кількості ядер радіоактивного ізотопу не розпадеться за час t , що дорівнює двом середнім термінам життя τ радіоактивного ядра.

4.3. Стала радіоактивного розпаду ізотопу $^{210}_{82}\text{Pb}$ дорівнює $\lambda = 10^{-9} \text{ с}^{-1}$. Визначити час, протягом якого розпадеться $2/5$ початкової кількості ядер цього радіоактивного ізотопу.

4.4. Визначити, що і у скільки разів є більш тривалим – три періоди напіврозпаду $T_{1/2}$ чи два середніх терміни життя радіоактивного ядра τ .

4.5. Визначити період напіврозпаду радіоактивного ізотопу, якщо $5/8$ початкової кількості ядер цього ізотопу розпалися за час $t = 849 \text{ с}$.

4.6. Період напіврозпаду радіоактивного ізотопу актинію $^{225}_{89}\text{Ac}$ складає $T_{1/2} = 10$ діб. Визначити час, за який розпадеться $1/3$ початкової кількості ядер актинію.

4.7. Вивести формулу для швидкості радіоактивного розпаду через період напіврозпаду $T_{1/2}$ і початкове число N_0 радіоактивних атомів.

4.8. Активність деякого радіоактивного ізотопу в початковий момент часу складає 100 Бк . Визначити активність цього ізотопу після проміжку часу, який дорівнює половині його періоду напіврозпаду.

4.9. Визначити період напіврозпаду деякого радіоактивного ізотопу, якщо його активність за $\tau = 5$ діб зменшилася у $2,2$ рази.

4.10. Лічильник Гейгера зареєстрував за 1 хв 4000β -частинок, що виникли при розпаді ядер радіоактивного ізотопу, а через добу - тільки 1000 розпадів. Визначити період напіврозпаду ізотопу.

4.11. Знайти сталу розпаду λ і середній час життя τ радіоактивного ізотопу $^{55}_{27}\text{Co}$, якщо відомо, що його активність зменшується на $\eta = 4\%$ за годину? Продукт розпаду нерадіоактивний.

4.12. Визначити кількість ΔN атомів радіоактивного препарату йоду $^{131}_{53}\text{I}$ масою $m = 0,5 \text{ мкг}$, що розпалися протягом часу $t_1 = 1 \text{ хв}$; $t_2 = 7$ діб. Період напіврозпаду ізотопу $T_{1/2} = 8$ діб.

4.13. Із кожного мільйона атомів радіоактивного ізотопу щосекунди розпадається 200 атомів. Визначити період напіврозпаду ізотопу.

4.14. Несистемною одиницею радіоактивності ізотопу є кюрі (Ки) – це активність препарату, що чисельно дорівнює активності 1 г радію, тобто тій кількості розпадів, що відбувається у 1 г радію за 1 с. Знайдіть це число, знаючи, що період напіврозпаду радію $T_{1/2} = 1620$ років.

4.15. На скільки відсотків зменшиться активність ізотопу іридію $^{193}_{77}\text{Ir}$ за час $t = 15$ діб?

4.16. У скільки разів зменшиться активність ізотопу фосфору $^{32}_{15}\text{P}$ за час $t = 20$ діб.

4.17. Знайдіть масу та об'єм радону при нормальних умовах, якщо радіоактивність його дорівнює 1 Бк.

4.18. Знайти середній час життя τ атома радіоактивного ізотопу кобальту $^{58}_{27}\text{Co}$.

4.19. Вважаючи, що всі атоми ізотопу магнію $^{27}_{12}\text{Mg}$ масою $m = 1$ мкг радіоактивні, визначити: 1) початкову активність A_0 цього ізотопу; 2) його активність A через 3 доби. Період напіврозпаду ізотопу $T_{1/2} = 10$ хв.

4.20. Активність A деякого ізотопу за час $t = 10$ діб зменшилася на 20%. Визначити період напіврозпаду $T_{1/2}$ цього ізотопу.

4.21. Визначити, яка частка радіоактивного ізотопу $^{227}_{89}\text{Ac}$ розпадається протягом часу $t = 6$ діб.

4.22. Яка частина атомів радіоактивного ізотопу торію $^{232}_{90}\text{Th}$, що має період напіврозпаду $T_{1/2} = 24,1$ дні, розпадається за 1 с; за добу; за місяць?

4.23. Знайти період напіврозпаду $T_{1/2}$ радіоактивного ізотопу, якщо його активність за час $t = 10$ діб зменшилася на 24% порівняно з початковою.

4.24. При розпаді радіоактивного полонію $^{210}_{84}\text{Po}$ протягом часу $t = 1$ год утворився гелій ^4_2He , що за нормальних умов зайняв об'єм $V = 89,5 \text{ см}^3$. Визначити період напіврозпаду $T_{1/2}$ полонію.

4.25. За час $t = 8$ діб розпалося $k = 3/4$ початкової кількості ядер радіоактивного ізотопу. Визначити період його напіврозпаду $T_{1/2}$.

4.26. Знайти за допомогою табличних значень мас атомів швидкості продуктів реакції $^{10}_5\text{B} + n \rightarrow ^7_3\text{Li} + \alpha$, що проходить у результаті взаємодії нейтронів, кінетичною енергією яких можна знехтувати, з ядрами бору, що перебувають у стані спокою.

4.27. Протони, що налітають на нерухому літієву мішень, збуджують реакцію $^7_3\text{Li} + p \rightarrow ^7_4\text{Be} + n$. При якому значенні кінетичної енергії протона нейтрон, що виник, може перебувати у стані спокою?

4.28. Альфа-частинка з кінетичною енергією $E_\alpha = 5,3 \text{ MeV}$ збуджує ядерну реакцію $^9_4\text{Be} + \alpha \rightarrow ^{12}_6\text{C} + n$, енергія якої $Q = 5,7 \text{ MeV}$. Знайти кінетичну енергію нейтрона, що вилетів під прямим кутом до напрямку руху α -частинки.

4.29. Протони з кінетичною енергією $E_k = 1,0 \text{ MeV}$ бомбардують літієву мішень, у результаті чого спостерігається ядерна реакція $^7_3\text{Li} + p \rightarrow 2 \cdot ^4_2\text{He}$. Знайти кінетичну енергію кожної α -частинки і кут між напрямками їх розльоту, якщо розліт відбувається симетрично відносно напрямку протонів, що налітають.

4.30. Яку кінетичну енергію необхідно надати протону, щоб він зміг розщепити ядро важкого водню ^2_1H , що перебуває у стані спокою, енергія зв'язку якого $E_{\text{зв}} = 2,2 \text{ MeV}$?

4.31. При опроміненні моноенергетичним пучком протонів мішеней з літію і берилію було виявлено, що реакція $^7_3\text{Li} + p \rightarrow ^7_4\text{Be} + n - 1,65 \text{ MeV}$

проходить, а ${}^9_4\text{Be} + p \rightarrow {}^9_5\text{B} + n$ - 1,85 MeV не відбувається. Знайти можливі значення кінетичної енергії протонів.

4.32. Для того щоб почалася реакція (n, α) на ядрах ${}^{11}_5\text{B}$, що перебувають у стані спокою, гранична кінетична енергія нейтронів $E_{ep} = 4,0$ MeV. Знайти енергію цієї реакції.

4.33. Обчислити граничні кінетичні енергії протонів для реакцій (p, n) і (p, d) на ядрах ${}^7_3\text{Li}$.

4.34. Знайти за допомогою табличних значень мас атомів граничну кінетичну енергію α -частинки, необхідну для ядерної реакції ${}^7_3\text{Li} + \alpha \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + n$. Яка при цьому швидкість ядра ${}^{10}_5\text{B}$?

4.35. Нейтрон з кінетичною енергією $E = 10$ MeV збуджує ядерну реакцію ${}^{12}_6\text{C} + n \rightarrow {}^9_4\text{Be} + \alpha$, поріг якої $E_{ep} = 6,17$ MeV. Знайти кінетичну енергію α -частинок, що вилітають під прямим кутом до падаючого нейтрона.

4.36. На скільки відсотків гранична енергія γ - кванта перевищує енергію зв'язку дейтрона ($E_{ze} = 2,2$ MeV) у реакції $\gamma + {}^2_1\text{H} \rightarrow n + p$?

4.37. Вихід ядерної реакції ${}^2_1\text{d} + {}^{13}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n}$ має максимуми при таких значеннях кінетичної енергії E_κ дейтонів, що налітають на ядро: 0,60, 0,90, 1,55 і 1,80 MeV. Знайти за допомогою табличних значень мас атомів відповідні енергетичні рівні проміжного ядра, через які проходить ця реакція.

4.38. Знайти енергію, що поглинається при ядерній реакції ${}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n}$.

4.39. Ядро берилію Be, захопивши дейтрон, перетворюється у ядро бору B. Записати рівняння реакції та визначити величину енергії, що при цьому виділяється.

4.40. При бомбардуванні ядер атома бору В ядрами важкого водню відбувається ядерна реакція $^{10}_5\text{B} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^{12}_6\text{C} \rightarrow 3 \cdot ^4_2\text{He}$. Визначити кількість енергії, що виділяється при цьому перетворенні.

4.41. На атомній електростанції за рік витрачається $m = 19,2$ кг урану $^{235}_{92}\text{U}$. Враховуючи, що при кожному акті розпаду ядра $^{235}_{92}\text{U}$ вивільняється енергія $E = 200$ MeV і коефіцієнт корисної дії при виробленні електроенергії дорівнює $\eta = 25\%$, знайти електричну потужність атомної електростанції.

4.42. Порівняйте енергії, що виділяються при термоядерному синтезі $^2_1\text{H} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He}$ (E_D) і розпаді ядра урану $^{235}_{92}\text{U}$ (E_U), якщо в обох випадках витрачаються однакові маси ядерного пального. Кожен акт розпаду супроводжується виділенням енергії $E = 200$ MeV.

4.43. Ядро $^{200}_{84}\text{Po}$, що перебуває у стані спокою, випромінює α -частинку з кінетичною енергією $E_\alpha = 5,77$ MeV. Знайти швидкість віддачі дочірнього ядра. Яку частку повної енергії, що вивільняється в цьому процесі, складає енергія віддачі дочірнього ядра?

4.44. Визначити кількість тепла, що виділяє $m = 1$ мг препарату $^{200}_{84}\text{Po}$ за період, що дорівнює середньому часу життя цих ядер, якщо відомо, що випускаються α -частинки, які мають кінетичну енергію $E_\kappa = 5,3$ MeV, і практично всі дочірні ядра утворюються безпосередньо в основному стані.

4.45. Оцінити кількість тепла, що виділяється за добу в калориметрі реактивним препаратом $^{24}_{11}\text{Na}$, маса якого $m = 1$ мг. Вважати, що β -частинки в середньому мають кінетичну енергію, що дорівнює максимально можливій при даному розпаді. Період напіврозпаду $^{24}_{11}\text{Na}$ $T_{1/2} = 15$ год.

4.46. Збуджені ядра $^{109}_{47}\text{Ag}$, переходячи в основний стан, випромінюють γ -кванти з енергією $E = 87$ кеВ та β -електрони (їх енергія зв'язку 26 кеВ). Визначити швидкість цих електронів.

4.47. Вільне ядро $^{191}_{77}\text{Ir}$, що перебуває у стані спокою, з енергією розпаду $E = 129$ кеВ перейшло в основний стан, при цьому воно випромінило γ -квант. Обчислити відносну зміну енергії γ -кванта, що виникає у результаті віддачі ядра.

4.48. З якою відносною швидкістю повинні зближатися джерело і поглинач, що складаються з вільних ядер $^{191}_{77}\text{Ir}$ з масою 1 г, щоб спостерігалось максимальне поглинання γ -квантів з енергією $E = 129$ кеВ?

4.49. Альфа-частинка з кінетичною енергією $E_{\alpha} = 7,0$ МеВ пружно розсіялася на ядрі ^7_3Li , що перебуває у стані спокою. Визначити кінетичну енергію ядра віддачі, якщо кут між напрямками розльоту обох частинок $\varphi = 60^\circ$.

4.50. Вважаючи, що в одному акті розпаду ядра $^{235}_{92}\text{U}$ вивільняється енергія $E = 200$ МеВ, визначити енергію, що виділяється при розпаді одного кілограма ізоотопу $^{235}_{92}\text{U}$, а також масу кам'яного вугілля з теплотворною здатністю 30 кДж/г, яка є еквівалентною у тепловому відношенні до одного кілограма урану.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Курс загальної фізики : навч. посіб. для ВНЗ / В.В. Кармазін, В.В. Семенець. – К. : Кондор, 2016. – 786 с.
2. Бушок, .Ф. Курс фізики. Т.ІІІ : Оптика. Фізика атома та атомного ядра / Г.Ф. Бушок, Є.Ф. Венгер. – К. : Вища шк., 2003. – 311 с.
3. Чолпан, П.П. Фізика / П.П. Чолпан. – К. : Вища шк., 2003. – 566 с.
4. Волькенштейн, В.С. Сборник задач по общему курсу физики / В.С. Волькенштейн. – М. : Наука, 1985. – 381 с.

Зразок титульного аркушу

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ВИЩОЇ МАТЕМАТИКИ І ФІЗИКИ

Індивідуальна робота
з дисципліни Фізика ч. II
Варіант №__

Виконав(ла):

студент(ка) гр. _____

(ПІБ)

Перевірив(ла): _____
(посада, ПІБ)

Покровськ 2021

ДОВІДКОВІ ДАНІ

Таблиця 1 - Деякі основні фізичні константи

Гравітаційна стала	$\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$
Швидкість світла у вакуумі	$c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Стала Планка	$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Стала Дірака	$\hbar = h/(2\pi) = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Прискорення вільного падіння	$g = 9,81 \text{ м/с}^2$
Універсальна молярна газова стала	$R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$
Стала Авогадро	$N_a = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Стала Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Стандартний об'єм (об'єм одного моля газу при н.у.)	$V_0 = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$
Елементарний заряд	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Питомий заряд електрона	$e/m_e = 1,7588 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$
Електрична стала	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Магнітна стала	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Стала Стефана - Больцмана	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Стала в законі зміщення Віна	$b = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Стала Рідберга	$R = 1,10 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ $R' = 2,07 \cdot 10^{-16} \text{ с}^{-1}$
Енергія іонізації атома водню	$E_i = 2,18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} (13,6 \text{ еВ})$
Енергія спокою електрона	$E_{0e} = 8,16 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} = 0,511 \text{ MeV}$
Комптонівська довжина хвилі електрона	$\lambda_C = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}$
Магнетон Бора	$\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}$
Боровський радіус	$a = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ м}$
Уніфікована атомна одиниця маси	$1 \text{ а.о.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Енергія, яка відповідає 1 а.о.м	$931,4 \text{ MeV}$

Таблиця 2 - Деякі астрономічні величини

Радіус Землі	$6,37 \cdot 10^6$ м
Маса Землі	$5,98 \cdot 10^{24}$ кг
Радіус Місяця	$1,74 \cdot 10^6$ м
Маса Місяця	$7,33 \cdot 10^{22}$ кг
Радіус Сонця	$6,95 \cdot 10^8$ м
Маса Сонця	$1,98 \cdot 10^{30}$ кг
Відстань від центра Землі до центра Місяця	$3,84 \cdot 10^8$ м
Відстань від центра Землі до центра Сонці	$1,49 \cdot 10^{11}$ м

Таблиця 3 - Густина деяких газів при нормальних умовах

Газ	Густина ρ , кг/м ³	Газ	Густина ρ , кг/м ³
Азот	1,25	Гелій	0,18
Аргон	1,78	Кисень	1,43
Водень	0,09	Повітря	1,29

Таблиця 4 - Густини деяких рідин (при 15°C)

Рідина	Густина $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	Рідина	Густина $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³
Вода	1,00	Олія оливкова	0,96
Бензин	0,80	Сірководень	1,26
Гліцерин	1,26	Спирт	0,80
Ефір	0,70	Ртуть	13,6
Гас	0,80		

Таблиця 5 - Густина деяких твердих тіл

Тверде тіло	Густина $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	Тверде тіло	Густина $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³
Алюміній	2,69	Молибден	10,2
Барій	3,50	Нікель	8,5
Ванадій	6,02	Ніхром	8,4
Вісмут	9,80	Олово	7,98
Вольфрам	19,30	Платина	21,4
Залізо (сталь)	7,87	Свинець	11,34
Золото	19,3	Срібло	10,5
Кам'яна сіль	2,2	Тантал	16,6
Кобальт	8,9	Титан	4,54
Константан	8,9	Уран	18,7
Лід	0,92	Фарфор	2,3
Літій	0,53	Хром	7,19
Латунь	8,55	Цезій	1,87
Марганець	7,4	Цинк	7,13
Мідь	8,96		

Таблиця 6 - Термодинамічні характеристики води

Питома теплоємність води	$c = 4190$ Дж/(кг·К)
Питома теплота пароутворення води	$r = 2258$ кДж/кг
Коефіцієнт поверхневого натягу води	$\sigma = 73$ мН/м
Динамічна в'язкість води	$\eta = 1,00$ мПа·с

Таблиця 7 - Механічні властивості твердих тіл

Тверде тіло	Модуль Юнга E , ГПа	Модуль зсуву G , ГПа	Коефіцієнт лінійного розширення $\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}
Алюміній	70,6	26,2	23,8
Вольфрам	410	140	4,3
Залізо (сталь)	210	81	11,9
Константан	210		17,0
Мідь	129,8	48,3	16,7
Молибден	324,8	125,6	5,09
Нікель	199,5	76,0	13,4
Срібло	82,7	30,3	18,7
Тантал	185,7	69,2	6,57
Титан	120,2	45,6	8,4
Фарфор	740		3

Таблиця 8 - Роботи виходу A електронів із деяких металів

Метал	A , еВ	$A \cdot 10^{19}$, Дж
Калій	2,2	3,5
Літій	2,3	3,7
Натрій	2,5	4,0
Платина	6,3	10,1
Срібло	4,7	7,5
Цинк	4,0	6,4

Таблиця 9 - Діелектрична проникність деяких матеріалів

Речовина	Діелектрична проникність ε
Гас	2
Вода	81
Віск	7,8
Ебоніт	3,0
Кварц	2,7
Масло (трансформаторне)	2,2
Парафін	2,1
Слюда	6,0
Скло	7,0
Фарфор	5,0

Таблиця 10 - Показники заломлення світла деякими речовинами

Речовина	n
Алмаз	2,42
Вода	1,33
Лід	1,31
Масло	1,60
Сірковуглець	1,63
Скло	1,50

Таблиця 11 - Типи радіоактивних перетворень і періоди напіврозпаду деяких радіоактивних ізотопів

Ізотоп	Тип розпаду	Період напіврозпаду, $T_{1/2}$
Актиній $^{225}_{89}\text{Ac}$	α	10 діб
Іридій $^{192}_{77}\text{Ir}$	β^{-}, γ	75 діб
Йод $^{131}_{53}\text{I}$	β^{-}, γ	8 діб
Кобальт $^{60}_{27}\text{Co}$	β^{-}, γ	5,3 роки
Магній $^{27}_{12}\text{Mg}$	β^{-}	10 хвилин
Натрій $^{22}_{11}\text{Na}$	γ	2,6 років
Радій $^{219}_{88}\text{Ra}$	α	10^{-3} с
Радій $^{226}_{88}\text{Ra}$	α, γ	$1,62 \cdot 10^3$ років
Радон $^{222}_{86}\text{Rn}$	α	3,8 діб
Стронцій $^{90}_{38}\text{Sr}$	β^{-}	27 років
Торій $^{229}_{90}\text{Th}$	α, γ	$7 \cdot 10^3$ років
Уран $^{238}_{92}\text{U}$	α, γ	$4,5 \cdot 10^9$ років
Фосфор $^{32}_{15}\text{P}$	β^{-}	14,3 діб

Таблиця 12 - Маси та енергії спокою деяких частинок

Частинка	Маса спокою		Енергія спокою	
	m_0 , кг	m_0 , а.о.м	E_0 , Дж	E_0 , МеВ
Електрон	$9,11 \cdot 10^{-31}$	0,00055	$8,16 \cdot 10^{-14}$	0,511
Протон	$1,672 \cdot 10^{-27}$	1,00728	$1,50 \cdot 10^{-10}$	938

Нейтрон	$1,675 \cdot 10^{-27}$	1,00867	$1,51 \cdot 10^{-10}$	939
Дейтрон	$3,35 \cdot 10^{-27}$	2,01355	$3,00 \cdot 10^{-10}$	1876
α -частинка	$6,64 \cdot 10^{-27}$	4,00149	$5,96 \cdot 10^{-10}$	3733

Таблиця 13 - Маса нейтральних атомів (а. о. м.)

Елемент	Порядковий номер	Ізотоп	Маса
1	2	3	4
Водень	1	${}^1_1\text{H}$	1,00783
		${}^2_1\text{H}$	2,01410
		${}^3_1\text{H}$	3,01605
Гелій	2	${}^3_2\text{He}$	3,01603
		${}^4_2\text{He}$	4,00260
Літій	3	${}^6_3\text{Li}$	6,01513
		${}^7_3\text{Li}$	7,01601
Берилій	4	${}^7_4\text{Be}$	7,01693
		${}^9_4\text{Be}$	9,01219
		${}^{10}_4\text{Be}$	10,01354
Бор	5	${}^9_5\text{B}$	9,01333
		${}^{10}_5\text{B}$	10,01294
		${}^{11}_5\text{B}$	11,00931
Вуглець	6	${}^{10}_6\text{C}$	10,00168
		${}^{12}_6\text{C}$	12,00000
		${}^{13}_6\text{C}$	13,00335

		$^{13}_6\text{C}$	14,00324
		$^{14}_6\text{C}$	
Азот	7	$^{13}_7\text{N}$	13,00574
		$^{14}_7\text{N}$	14,00307
		$^{15}_7\text{N}$	15,00011
Кисень	8	$^{16}_8\text{O}$	15,99491
		$^{17}_8\text{O}$	16,99913
		$^{18}_8\text{O}$	17,99916
Фтор	9	$^{19}_9\text{F}$	18,99840
Натрій	11	$^{22}_{11}\text{Na}$	21,99444
		$^{23}_{11}\text{Na}$	22,98977
Магній	12	$^{23}_{12}\text{Mg}$	22,99414
Алюміній	13	$^{30}_{13}\text{Al}$	29,99817
Кремній	14	$^{31}_{14}\text{Si}$	30,97535
Фосфор	15	$^{31}_{15}\text{P}$	30,97376
Калій	19	$^{41}_{19}\text{K}$	40,96184
Кальцій	20	$^{44}_{20}\text{Ca}$	43,95549
Свинець	82	$^{206}_{82}\text{Pb}$	205,97446
Полоній	84	$^{210}_{84}\text{Po}$	209,98297