



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до практичних занять та самостійної роботи з дисципліни
«ФІЗИКА»**

**Частина 2
Електромагнетизм, Хвильова оптика,
Квантова оптика і атомна фізика**

Електронне видання

Харків 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять та самостійної роботи з дисципліни

«ФІЗИКА»

для здобувачів вищої освіти заочної форми навчання усіх спеціальностей

Частина 2

Електромагнетизм, Хвильова оптика,

Квантова оптика і атомна фізика

Електронне видання

ЗАТВЕРДЖЕНО

кафедрою фізики.

Протокол №14 від 20.06.2025

Харків 2026

Методичні вказівки до практичних занять та самостійної роботи з дисципліни «ФІЗИКА». Частина 2 (Електромагнетизм, Хвильова оптика, Квантова оптика і атомна фізика) для здобувачів вищої освіти заочної форми навчання усіх спеціальностей [Електронний ресурс] / Упоряд.: О.М. Коваленко, Р.П. Орел, А.І. Рибалка, В.О. Стороженко, С.М. Мешков, В.В. Калінін, О.В. Мягкий, А.А. Онищенко, О.С. Чубукін, Ю.Д. Приймачов. – Електронне видання. – Харків: ХНУРЕ, 2026. – 110 с. – pdf 2,96 Мб.

Упорядники: О.М. Коваленко,
Р.П. Орел,
А.І. Рибалка,
В.О. Стороженко,
С.М. Мешков,
В.В. Калінін,
О.В. Мягкий,
А.А. Онищенко,
О.С. Чубукін,
Ю.Д. Приймачов

Рецензент Н.П. Стогній, канд. фіз.-мат. наук, зав. каф. вищої математики

ЗМІСТ

Загальні положення	4
1 Електромагнетизм.....	6
1.1 Мета заняття.....	6
1.2 Методичні вказівки з організації самостійної роботи	6
1.3 Основні закони і формули.....	7
1.4 Контрольні запитання та завдання.....	15
1.5 Приклади розв'язання задач	16
1.6 Задачі для самостійного розв'язання.....	29
2 Хвильова оптика	51
2.1 Мета заняття.....	51
2.2 Методичні вказівки з організації самостійної роботи	51
2.3 Основні закони і формули.....	52
2.4 Контрольні запитання та завдання.....	56
2.5 Приклади розв'язання задач	57
2.6 Задачі для самостійного розв'язання.....	63
3 Квантова оптика і атомна фізика	69
3.1 Мета заняття.....	69
3.2 Методичні вказівки з організації самостійної роботи	69
3.3 Основні закони і формули.....	70
3.4 Контрольні запитання та завдання.....	77
3.5 Приклади розв'язання задач	78
3.6 Задачі для самостійного розв'язання.....	88
4 Особливості виконання та оформлення контрольних робіт	96
Перелік джерел посилання	99
Додаток А. Основні фізичні сталі та астрономічні величини.....	100
Додаток Б. Основні фізичні характеристики деяких речовин	102
Додаток В. Корисна інформація під час вивчення фізичної літератури	109

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Фізика, як фундаментальна наука, має глибокий вплив на розвиток усіх природознавчих наук, таких як хімія, біологія, астрономія, інженерія та ін. Неймовірна широта практичного застосування дозволила їй стати потужним знаряддям технічного прогресу. На основі досліджень теоретичної та експериментальної фізики був створений цілий ряд найновіших технологій, без яких неможливо уявити аерокосмічну техніку, атомну енергетику, мікроелектроніку, комп'ютерну та лазерну техніку.

Таким чином, існує об'єктивна необхідність у вивченні фізики, особливо здобувачам вищої освіти інженерно-технічних спеціальностей, які повинні мати фундаментальну освіту, вміти нешаблонно мислити, бути здатними поглиблювати і розширювати свої знання відповідно до потреб динамічного розвитку техніки.

Крім того, для розв'язання технічних задач інженер повинен вміти користуватися існуючими програмними засобами і вміти створювати нові. Знання фізичних законів, вміння грамотно сформулювати задачу та її граничні умови дають можливість спеціалісту відрізнити правдоподібний результат від фантастичного.

Як показує багаторічний досвід, вивчення фізики здобувачами вищої освіти заочної форми навчання, засвоєння великої кількості теоретичного матеріалу і набуття практичних навичок у розв'язанні задач з фізики неможливе без істотного методичного підґрунтя.

Зважаючи на те, що аудиторні заняття посідають лише 15% від загальної кількості часу, відведеного на вивчення фізики, здобувачі вищої освіти мають навчитися добре працювати з літературою, перелік якої наведений у кінці методичних вказівок.

Треба звернути увагу на навчальні посібники і методичні вказівки, видані викладачами Харківського національного університету радіоелектроніки, які найкраще задовольняють вимогам до опанування курсу фізики, висунутим до здобувачів вищої освіти нашого ЗВО.

Аудиторні заняття проводяться на початку або в кінці кожного навчального семестру у вигляді установчих лекцій, практичних занять та лабораторних робіт, відвідування яких обов'язкове. На лекціях і практичних заняттях викладач звертає увагу здобувачів вищої освіти на основні питання

і теми розділу, що вивчається, знання яких, безперечно, необхідно для опанування курсу фізики і виконання контрольних робіт.

Крім домашніх контрольних робіт під час сесії здобувачі вищої освіти мають також виконати лабораторні роботи, оформити їх за вимогами і захистити їх на заняттях. Звіт з оформленими лабораторними роботами разом з рецензованою контрольною роботою здобувачі вищої освіти мають подати екзаменатору.

Дані методичні вказівки створені на основі програми з фізики Міністерства освіти і науки України для інженерно-технічних вищих навчальних закладів. Кожен розділ супроводжується необхідним для розв'язання задач теоретичним матеріалом, прикладами розв'язання задач і задачами, з яких складаються контрольні роботи.

Довідковий матеріал у вигляді таблиць поданий у додатку, що робить методичні вказівки самодостатніми.

Кожен здобувач вищої освіти заочної форми навчання має виконати одну або дві контрольні роботи з фізики залежно від кількості навчальних годин, що відрізняється для різних спеціальностей. Значна кількість задач для самостійної роботи дозволяє скласти будь-яку кількість контрольних робіт.

Для того, щоб розв'язати задачі з контрольних робіт, здобувачу вищої освіти спочатку необхідно опанувати відповідний теоретичний матеріал за підручниками та навчальними посібниками, а також звернути особливу увагу на основні закони й формули, що наведені на початку кожного розділу цих методичних вказівок. Після цього треба розібрати приклади розв'язання задач, які належать до відповідного розділу і лише тоді починати самостійно розв'язувати задачі.

Більш детально про виконання та оформлення контрольних робіт описано у розділі 4 Особливості виконання та оформлення контрольних робіт.

1 ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

1.1 Мета заняття

Засвоїти основні підходи, оволодіти методами та навчитися користуватися ними для розв'язання задач з електромагнетизму, а саме:

1. Користуючись основними законами магнетизму, навчитися розв'язувати задачі з розрахунку кількісних характеристик магнітного поля, дії магнітного поля на струми та заряджені частинки.
2. Вивчити закони електромагнітної індукції та рівняння Максвелла.
3. Засвоїти фізичні величини й рівняння, що характеризують електромагнітні коливання та хвилі.

1.2 Методичні вказівки з організації самостійної роботи

Під час підготовки до заняття необхідно вивчити теоретичний матеріал, наведений у конспекті лекцій та підручнику, відповісти на контрольні запитання, ретельно розібрати розв'язування задач, що наведені у прикладах.

Для досягнення першої частини мети заняття перед вирішенням задач необхідно опанувати теоретичний матеріал, викладений у [1, розд. 6, 7; 4, розд. 5; 6, розд. 5.1]. Зверніть увагу на зміст та межі застосування основних законів і формул цього розділу.

Для досягнення другої частини мети заняття перед вирішенням задач необхідно опанувати теоретичний матеріал, викладений у [1, розд. 8, 9; 4, розд. 7, 10; 6, розд. 5.3, 5.5]. Особливу увагу зверніть на закон Фарадея, правило Ленца, явища самоіндукції та взаємоіндукції. З'ясуйте фізичний зміст та межі застосування рівнянь Максвелла.

Для досягнення третьої частини мети заняття перед вирішенням задач необхідно опанувати теоретичний матеріал, викладений у [1, розд. 10, 12; 4, розд. 9, 10; 6, розд. 7]. Засвоїти фізичні принципи утворення вільних незгасаючих, загасаючих та вимушених коливань, а також випромінювання, розповсюдження та прийому електромагнітних хвиль.

1.3 Основні закони і формули

1. Принцип суперпозиції

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i,$$

де $\vec{B}$ – вектор магнітної індукції поля, яке породжується декількома рухомими зарядами (струмами), $\vec{B}_i$ – вектор магнітної індукції поля, яке породжується окремим рухомих зарядом (струмом).

У випадку накладання двох полів

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2,$$

а модуль вектора магнітної індукції

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 - 2B_1B_2 \cos \alpha},$$

де α – кут між векторами.

2. Магнітний момент плоского контуру зі струмом

$$\vec{p}_m = IS\vec{n},$$

де I – сила струму в плоскому контурі, S – площа контуру, $\vec{n}$ – одиничний вектор позитивної нормалі до контуру.

3. Закон Біо–Савара–Лапласа

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I [d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3},$$

де $d\vec{B}$ – магнітна індукція поля, яке створюється елементом провідника довжиною dl зі струмом силою I , μ_0 – магнітна стала, μ – магнітна проникність (у вакуумі $\mu=1$), $d\vec{l}$ – вектор, який дорівнює за модулем dl провідника і збігається за напрямком зі струмом, $\vec{r}$ – радіус-вектор, який проведений від середини елемента провідника до точки, у якій визначається магнітна індукція.

Модуль вектора $d\vec{B}$

$$dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2},$$

де α – кут між векторами $d\vec{l}$ і $\vec{r}$.

4. Зв'язок магнітної індукції $\vec{B}$ з напруженістю $\vec{H}$ магнітного поля

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}.$$

5. Магнітна індукція в центрі колового провідника зі струмом

$$B = \frac{\mu_0\mu I}{2R},$$

де R – радіус колового витка.

6. Магнітна індукція на осі колового струму

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi R^2 I}{(R^2 + h^2)^{3/2}},$$

де h – відстань від центра витка до точки, в якій визначається магнітна індукція.

7. Магнітна індукція поля, що створюється нескінченно довгим прямим провідником зі струмом

$$B = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \frac{I}{R},$$

де R – відстань від осі провідника.

8. Магнітна індукція поля, що створюється відрізком провідника

$$B = \frac{\mu_0\mu}{4\pi} \frac{I}{r_0} (\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2),$$

де позначення I , r_0 , φ_1 , φ_2 зрозумілі з рис. 1.1, а (вектор $\vec{B}$ напрямлений перпендикулярно площині креслення до нас).

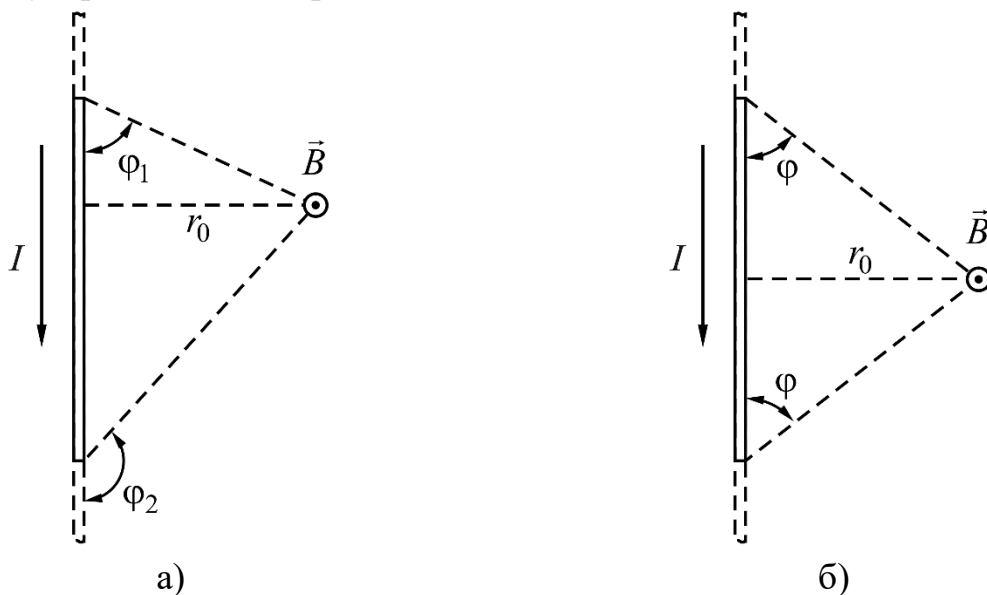


Рисунок 1.1

При симетричному розташуванні кінців провідника відносно точки, у якій визначається магнітна індукція (рис. 1.1, б)

$$-\cos \varphi_2 = \cos \varphi_1 = \cos \varphi,$$

Отже,

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi r_0} I \cos \varphi.$$

9. Магнітна індукція поля всередині соленоїда

$$B = \frac{\mu_0 \mu N I}{l},$$

де N – кількість витків соленоїда, l – довжина соленоїда, I – сила струму в одному витку.

10. Закон Ампера.

Сила, що діє на провідник зі струмом у магнітному полі

$$\vec{F} = I [\vec{l}, \vec{B}],$$

де I – сила струму, $\vec{l}$ – вектор, який за модулем дорівнює довжині l провідника і за напрямком збігається з напрямком струму, $\vec{B}$ – магнітна індукція поля.

Модуль вектора сили $\vec{F}$

$$F = IBl \sin \alpha,$$

де α – кут між векторами $\vec{l}$ і $\vec{B}$.

Сила, що діє на елемент провідника dl зі струмом I у магнітному полі

$$d\vec{F} = I [d\vec{l}, \vec{B}],$$

$$dF = IBdl \sin \alpha,$$

де α – кут між векторами $d\vec{l}$ і $\vec{B}$.

11. Механічний (обертальний) момент, що діє на контур зі струмом в однорідному магнітному полі

$$\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}],$$

$$M = p_m B \sin \alpha,$$

де α – кут між векторами $\vec{p}_m$ і $\vec{B}$.

12. Потенціальна (механічна) енергія контуру зі струмом у магнітному полі

$$W_p = -\vec{p}_m \vec{B} = -p_m B \cos \alpha .$$

13. Сила Лоренца

$$\vec{F} = q[\vec{v}, \vec{B}] ,$$

$$F = qvB \sin \alpha ,$$

де $\vec{v}$ – швидкість зарядженої частинки, q – заряд частинки, α – кут між векторами $\vec{v}$ і $\vec{B}$.

Якщо частинка знаходиться одночасно в електричному і магнітному полях, то сила Лоренца має вигляд

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}] ,$$

де $\vec{E}$ – напруженість електричного поля.

14. Теорема про циркуляцію вектора $\vec{B}$ (закон повного струму для магнітного поля у вакуумі)

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_l dl = \mu_0 \sum_{k=1}^n I_k ,$$

де n – число провідників зі струмом, які охоплені контуром $\vec{B}$ довільної форми.

15. Потік вектора магнітної індукції (магнітний потік) крізь площу dS

$$d\Phi = \vec{B} d\vec{S} = B_n dS ,$$

де $B_n = B \cos \alpha$ – проекція вектора $\vec{B}$ на напрямок нормалі до площини dS (α – кут між векторами $\vec{n}$ і $\vec{B}$), $d\vec{S} = \vec{n} dS$ – вектор, модуль якого дорівнює dS , а напрямок збігається з напрямком нормалі $\vec{n}$ до площини dS .

Магнітний потік крізь довільну поверхню

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S B_n dS ..$$

16. Повний потік (потокосцеплення)

$$\Psi = N\Phi ,$$

де N – кількість витків соленоїда або тороїда з рівномірним намотуванням, які щільно прилягають один до одного.

17. Робота з переміщення провідника зі струмом у магнітному полі

$$dA = Id\Phi.$$

18. Робота з переміщення контуру зі струмом

$$dA = I(d\Phi_2 - d\Phi_1),$$

де $d\Phi_1$ – потік, який пронизує контур у початковому положенні, $d\Phi_2$ – у кінцевому.

19. Закон Фарадея (закон електромагнітної індукції)

$$\varepsilon_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt},$$

де ε_{ind} – електрорушійна сила електромагнітної індукції (ЕРС).

20. ЕРС індукції, що виникає під час обертання рамки у магнітному полі

$$\varepsilon_{ind} = BS\omega \sin \omega t,$$

де ω – кутова швидкість.

21. Різниця потенціалів на кінцях провідника, який рухається зі швидкістю v у магнітному полі

$$U = Blv \sin \alpha, ,$$

де l – довжина провідника, α – кут між векторами $\vec{v}$ і $\vec{B}$.

22. Індуктивність контуру

$$L = \frac{\Phi}{I}.$$

23. ЕРС самоіндукції

$$\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt}.$$

24. Індуктивність соленоїда

$$L = \mu_0 \mu \cdot \frac{N^2 S}{l},$$

де N – кількість витків соленоїда, l – його довжина, S – площа поперечного перерізу соленоїда.

25. Миттєве значення сили струму у колі з опором R та індуктивністю L :

а) із замиканням кола

$$I = I_0 \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right);$$

б) із розмиканням кола

$$I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t},$$

де I_0 – сила струму у колі при $t = 0$, t – час, який минув після замикання чи розмикання кола.

26. Взаємна індуктивність двох котушок, які намотані на загальне тороїдальне осердя

$$L_{12} = L_{21} = \mu_0 \mu \cdot \frac{N_1 N_2}{l} S,$$

де N_1 , N_2 – кількість витків на первинній і вторинній котушках відповідно, l – довжина осердя по середній лінії, S – площа поперечного перерізу соленоїда, μ – магнітна проникність осердя.

27. Повний магнітний потік (потокозчеплення) крізь вторинну обмотку

$$\Psi = \Phi_2 N_2 = \mu_0 \mu \cdot \frac{N_1 N_2}{l} S I_1,$$

де I_1 – сила струму у первинній котушці.

28. Коефіцієнт трансформації трансформатора

$$k = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \mu_0 \mu \cdot \frac{N_1 N_2}{l} S I_1,$$

де I_1 і I_2 – сила струмів у першій і другій котушках відповідно, ε_1 і ε_2 – ЕРС у першій і другій котушках відповідно.

29. Енергія магнітного поля, зчепленого з контуром

$$W = LI^2/2.$$

30. Енергія магнітного поля соленоїда

$$W = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu} V = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} V = \frac{BH}{2} V,$$

де $V = Sl$ – об'єм соленоїда.

31. Об'ємна густина енергії

$$w = \frac{W}{V} = \frac{B^2}{2\mu_0\mu} = \frac{\mu_0\mu H^2}{2} = \frac{BH}{2}.$$

32. Магнітна проникність феромагнетику

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}.$$

33. Залежність між магнітною індукцією поля у феромагнетику і напруженістю намагнічуючого поля

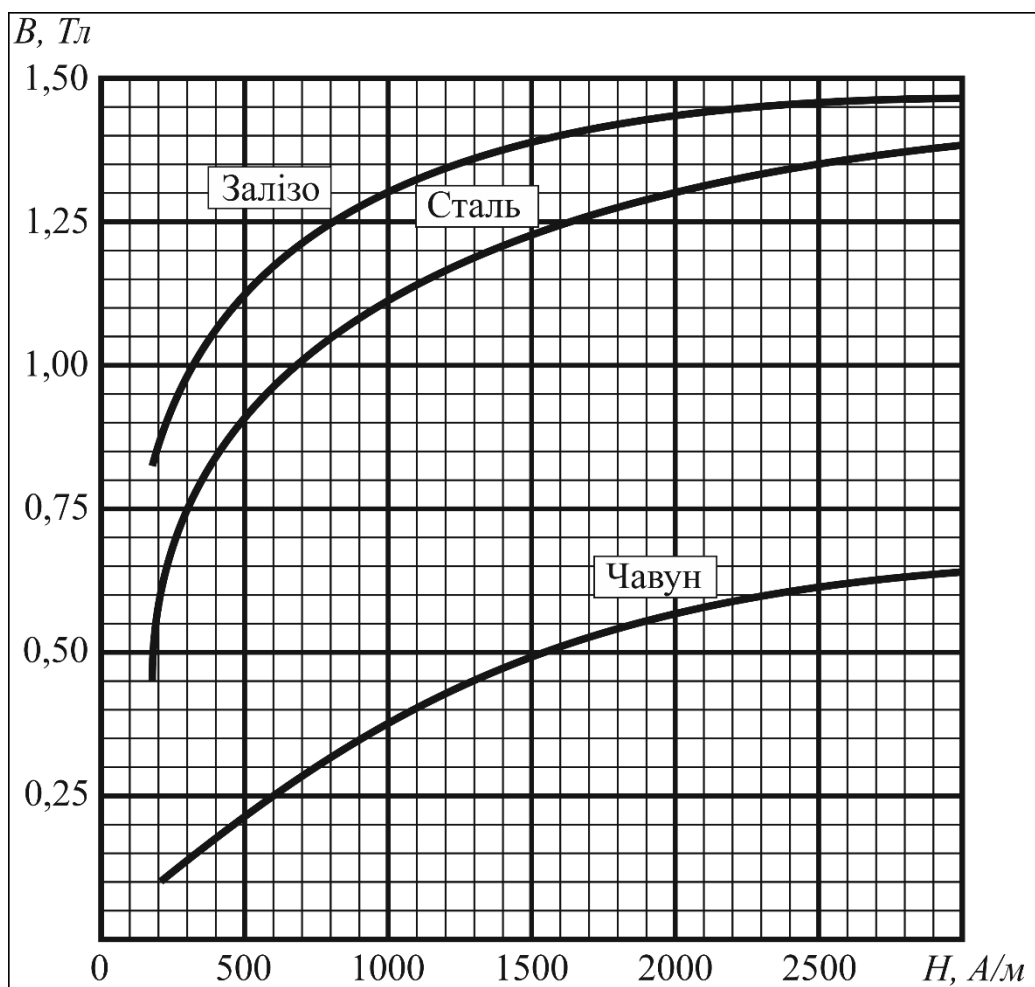


Рисунок 1.2

34. Формула Томсона

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

де L – індуктивність контуру, C – його електроємність.

35. 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.

36. Швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с},$$

де ϵ_0 і μ_0 – відповідно електрична і магнітна сталі.

37. Фазова швидкість (швидкість поширення у середовищі фази монохроматичної хвилі)

$$v = c/n = c/\sqrt{\epsilon},$$

де n – абсолютний показник заломлення, ϵ – відносна діелектрична проникність середовища.

38. Групова швидкість (швидкість поширення енергії хвилею)

$$u = c^2/v.$$

39. Довжина хвилі в середовищі

$$\lambda = vT = v/\nu.$$

40. Хвильовий опір середовища

$$\rho = \frac{E_m}{H_m} = \sqrt{\frac{\mu \mu_0}{\epsilon \epsilon_0}}.$$

41. Хвильовий опір вакууму (повітря)

$$\rho = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 120\pi = 377 \text{ Ом}.$$

42. Зв'язок між миттєвими значеннями напруженостей електричного $\vec{E}$ і магнітного $\vec{H}$ полів в електромагнітній хвилі

$$E\sqrt{\epsilon_0 \epsilon} = H\sqrt{\mu_0 \mu}.$$

43. Зв'язок між амплітудними значеннями векторів $\vec{E}$ і $\vec{H}$

$$E_m \sqrt{\epsilon_0 \epsilon} = H_m \sqrt{\mu_0 \mu}.$$

44. Об'ємна густина енергії електромагнітної хвилі

$$w = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} = \epsilon_0 \epsilon E^2 = \mu_0 \mu H^2 = \frac{\sqrt{\epsilon \mu}}{c} EH = \sqrt{\epsilon_0 \epsilon \mu_0 \mu} EH.$$

45. Вектор Пойнтінга (вектор густини потоку енергії хвилі)

$$\vec{S} = [\vec{E}, \vec{H}].$$

46. Модуль густини потоку енергії

$$S = wv = wc = EH.$$

47. Імпульс електромагнітної хвилі

$$G = \frac{S}{c^2} = \frac{EH}{c^2}.$$

48. Тиск електромагнітних хвиль на поверхню

$$p = \langle w \rangle (1 + \rho) \cos \varphi,$$

де ρ – коефіцієнт відбиття, $\langle w \rangle$ – середнє значення об'ємної густини енергії електромагнітних хвиль, φ – кут падіння.

49. Зв'язок між енергією електромагнітної хвилі W та імпульсом G

$$G = W/c.$$

50. Інтенсивність електромагнітної хвилі

$$I = \frac{v}{T} \int_0^T w dt = \langle w \rangle v = \left| \langle \vec{S} \rangle \right| = \left| \langle [\vec{E}, \vec{H}] \rangle \right|.$$

1.4 Контрольні запитання та завдання

1. Яка величина є силовою характеристикою магнітного поля?
2. Як визначають напрямок вектора магнітної індукції?
3. Що характеризують силові лінії магнітного поля і як вони напрямлені?
4. У чому полягає відмінність електричного і магнітного полів?

5. Чому магнітне поле вважається вихровим?
6. Чому дорівнює сила, що діє в магнітному полі, на елемент струму і на провідник скінченної довжини? Як вона напрямлена?
7. Чому дорівнює сила взаємодії двох паралельних провідників?
8. Як поводить себе контур, яким тече струм, під час потрапляння в однорідне магнітне поле?
9. Чому дорівнює момент сил, що діє на контур, яким тече струм, під час його потрапляння в однорідне магнітне поле?
10. Чому дорівнює потенціальна енергія контуру, яким тече струм, в однорідному магнітному полі?
11. Як поводить себе контур, яким тече струм, в неоднорідному магнітному полі?
12. Яке значення та напрям має сила, що діє на електричний заряд, який влетів в однорідне магнітне поле?
13. Які властивості має сила Лоренца?
14. У чому полягає відмінність електричної сили від сили Лоренца?
15. Чому дорівнює робота сили Лоренца під час руху електричного заряду в магнітному полі?
16. Коли заряджена частинка рухається по гвинтовій лінії? Чому дорівнює радіус кривизни і крок гвинтової лінії?
17. У чому полягає ефект Холла?
18. Сформулюйте закон Біо–Савара–Лапласа.
19. Чому дорівнює магнітний дипольний момент і який напрямок він має?
20. У чому полягає принцип суперпозиції для вектора магнітної індукції?
21. Чому дорівнює і як напрямлене магнітне поле, створене рухомим зарядом?
22. Що таке потік вектора магнітної індукції? Сформулюйте теорему Гауса для вектора магнітної індукції.
23. Яка теорема доводить вихровий характер магнітного поля?
24. Сформулюйте теорему про циркуляцію вектора магнітної індукції.
25. У чому полягає відмінність циркуляції для векторів $\vec{E}$ і $\vec{B}$?

1.5 Приклади розв'язання задач

Задача 1. Відстань між двома паралельними прямими нескінченно довгими провідниками, якими течуть у протилежних напрямках струми силою $I_1 = 30 \text{ А}$ і $I_2 = 40 \text{ А}$, дорівнює $d = 15 \text{ см}$. Визначити магнітну індукцію B

у точці, яка знаходиться на відстані $r_1 = 10$ см від першого і $r_2 = 20$ см від другого провідника.

Розв'язання

Вектор магнітної індукції $\vec{B}$ у визначеній точці, відповідно до принципу суперпозиції полів $\vec{B}_1$ і $\vec{B}_2$, створених струмами I_1 і I_2 у провідниках, дорівнює геометричній сумі полів $\vec{B}_1$ і $\vec{B}_2$, тобто $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$ (рис. 1.3).

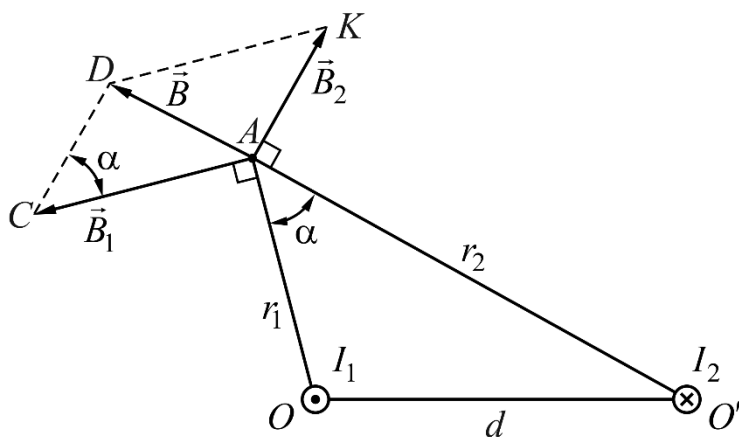


Рисунок 1.3

Напрямки векторів $\vec{B}_1$ і $\vec{B}_2$ визначаються за правилом гвинта.

Абсолютне значення магнітної індукції B знайдемо за теоремою косинусів з трикутника ACD , в якому сторона $CD = B_2$ і сторона $AC = B_1$. Кут ACD позначимо як α . Тоді

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 - 2B_1B_2 \cos \alpha}. \quad (1)$$

Значення магнітних індукцій B_1 і B_2 знаходимо за формулами:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r_1} \text{ і } B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi r_2}, \quad (2)$$

$\angle ACD = \angle OAO'$ як кути, що знаходяться між взаємно перпендикулярними сторонами ($OA \perp AC$, $O'A \perp AK$, $AK \parallel CD$), тому значення $\cos \alpha$ знайдемо з трикутника $OA O'$. Згідно з теоремами косинусів $d^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos \alpha$, звідки

$$\cos \alpha = \frac{r_1^2 + r_2^2 - d^2}{2r_1r_2}. \quad (3)$$

Підставляючи (2) і (3) у вираз (1), знаходимо

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \sqrt{\frac{I_1^2}{r_1^2} + \frac{I_2^2}{r_2^2} - \frac{I_1 I_2}{r_1 r_2} \frac{(r_1^2 + r_2^2 - d^2)}{r_1 r_2}}.$$

Відповідь: $B = 43,6$ мкТл.

Задача 2. Тонке дротяне кільце радіусом $R = 10$ см розташоване відносно нескінченного прямого провідника так, що його площина паралельна цьому проволу. Перпендикуляр, проведений із центра кільця до проволу, є нормаллю до площини кільця. Струм у провіднику $I_1 = 1$ А. Струм у кільці $I_2 = 2$ А. Відстань від провідника до центра кільця $d_1 = 20$ см, а відстань до точки A на осі кільця дорівнює $d_2 = 30$ см (рис. 1.4). Знайти магнітну індукцію в точці A .

Розв'язання

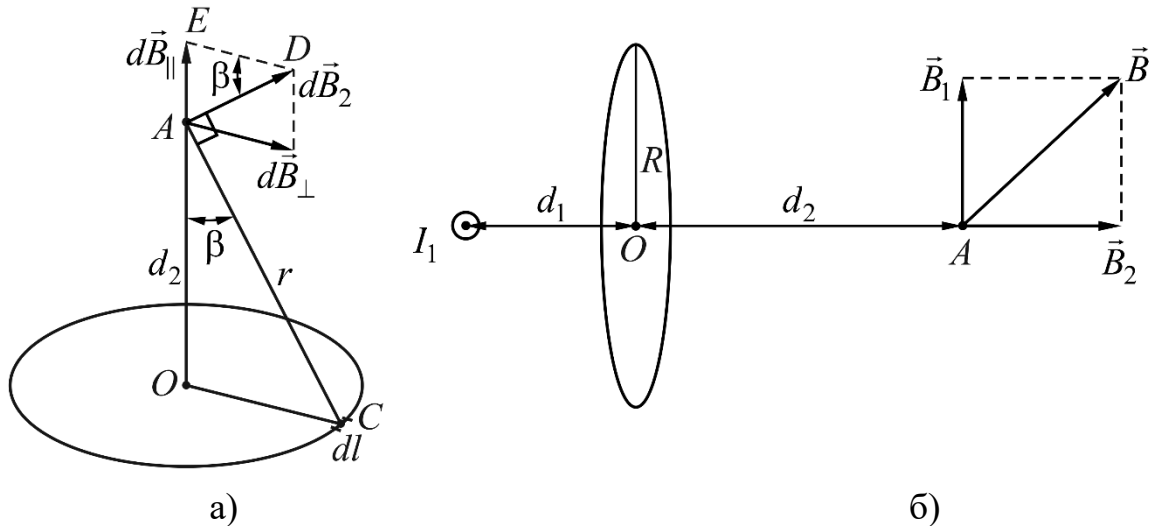


Рисунок 1.4

Відповідно до принципу суперпозиції, магнітна індукція $\vec{B}$ в точці A , яка розташована на осі колового струму на відстані d_2 від центра кільця, дорівнює геометричній сумі векторів

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2,$$

де $\vec{B}_1$ – магнітна індукція, яка створюється у точці нескінченим прямим проволу, а $\vec{B}_2$ – відповідно кільцем.

Модуль магнітної індукції B відповідно до рис. 1.4, б

$$B = |\vec{B}| = \sqrt{B_1^2 + B_2^2}. \quad (1)$$

Магнітна індукція $\vec{B}_1$ прямого нескінченного проволу у точці A

$$B_1 = \mu_0 \frac{I_1}{2\pi(d_1 + d_2)}. \quad (2)$$

Щоб знайти магнітну індукцію B_2 кільця у точці A , скористаємося законом Біо–Савара–Лапласа

$$d\vec{B}_2 = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I [d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}. \quad (3)$$

Кожен елемент струму $d\vec{l}$ створює у точці A магнітну індукцію $d\vec{B}_2$.
Всі вектори $d\vec{B}_2$ перпендикулярні до площин, що проходять крізь відповідний елемент струму $d\vec{l}$ і точку A , в якій визначаємо поле.

Розкладемо вектор $d\vec{B}_2$ на нормальну до відстані d_2 і паралельну складові

$$d\vec{B}_2 = d\vec{B}_\perp + d\vec{B}_\parallel.$$

Сумарне поле у точці A від кільця

$$\vec{B}_2 = \oint d\vec{B}_2 = \oint d\vec{B}_\perp + \oint d\vec{B}_\parallel.$$

Внаслідок симетрії $\oint d\vec{B}_\perp = 0$. Отже, $\vec{B}_2 = \oint d\vec{B}_\parallel$, і результуючий вектор $\vec{B}_2$ направлений уздовж осі контуру. Кожен з векторів $d\vec{B}_2$ вносить у результуючий вектор $\vec{B}_2$ внесок $d\vec{B}_\parallel$, що за модулем дорівнює

$$dB_\parallel = dB_2 \sin \beta.$$

Розглянемо трикутники OCA і ADK . Кути OAC і ADK рівні один одному як такі, що вміщені між взаємно перпендикулярними сторонами. Тоді з трикутника OAC

$$\sin \beta = R/r. \quad (4)$$

Відповідно до закону Біо–Савара–Лапласа (3) з урахуванням (4) маємо

$$dB_\parallel = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_2 dl}{r^2} \frac{R}{r} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_2 R}{r^3} dl. \quad (5)$$

Оскільки $r = \sqrt{R^2 + d_2^2}$, то вираз (5) має вигляд

$$d\vec{B}_\parallel = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_2 R dl}{(R^2 + d_2^2)^{3/2}}. \quad (6)$$

Проінтегруємо (6) за довжиною кільця L і отримаємо модуль вектора $\vec{B}_2$

$$B_2 = \oint_L dB_\parallel = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_2 R}{(R^2 + d_2^2)^{3/2}} \oint_L dl = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_2 R}{(R^2 + d_2^2)^{3/2}} 2\pi R = \frac{\mu_0 I_2 R^2}{2(R^2 + d_2^2)^{3/2}}, \quad (7)$$

Відповідно до (1), (2) і (7), результуюча магнітна індукція у точці дорівнює

$$B = \frac{\mu_0}{2} \sqrt{\frac{I_1^2}{\pi^2 (d_1 + d_2)^2} + \frac{I_2^2 R^4}{(R^2 + d_2^2)^3}}.$$

Відповідь: $B = 0,29$ мкТл.

Задача 3. Квадратний провідний контур, сторона якого дорівнює $a = 40$ см розміщений в одній площині з нескінченним прямолінійним провідником зі струмом $I = 4$ А так, що його дві сторони паралельні провіднику. Сила струму у контурі $I_1 = 2$ А. Визначити силу, яка діє на контур, якщо відстань між провідником і найближчою стороною квадрата дорівнює $h = 5$ см. Напрямки струмів у провіднику і найближчій до нього стороні квадрата збігаються.

Розв'язання

Зобразимо умову задачі на рисунку (рис. 1.5, а). Відповідно до правила правого гвинта визначаємо напрямок індукції $\vec{B}$ магнітного поля – вона буде перпендикулярна площині контуру і спрямована від нас.

Результуюча сила, що діє на контур, дорівнює геометричній сумі сил, які діють з боку магнітного поля на кожну із сторін квадрата, тобто

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4.$$

Сили $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, \vec{F}_4$ мають напрямки відповідно до закону Ампера і показані на рис. 1.5, б.

Сили $\vec{F}_2 = -\vec{F}_4$. Отже, результуюча сила

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_3.$$

Сили $\vec{F}_1$ і $\vec{F}_3$ спрямовані протилежно одна одній, тому величина результуючої сили

$$F = F_1 - F_3. \quad (1)$$

Сила взаємодії $\vec{F}_1$ між нескінченним провідником і найближчою до нього стороною квадрата

$$F_1 = \frac{\mu_0 I_1 I}{2\pi b}. \quad (2)$$

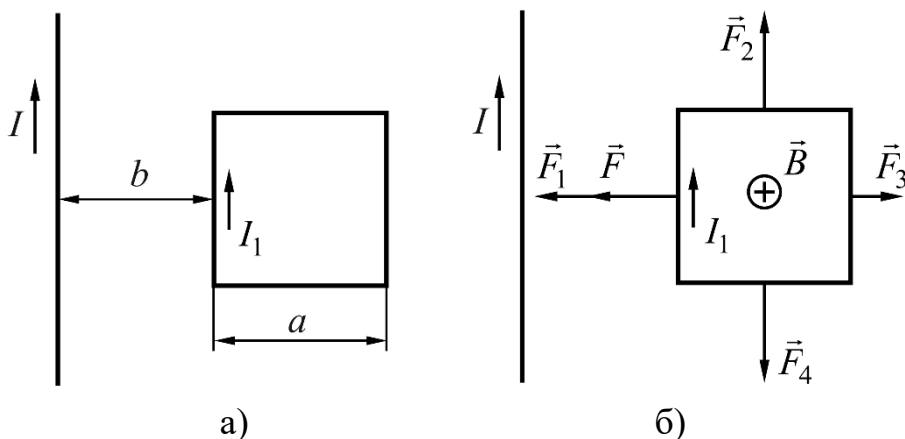


Рисунок 1.5

Відповідно для сили $\vec{F}_3$ маємо

$$F_3 = \frac{\mu_0 I_1 I}{2\pi(b+a)}. \quad (3)$$

Підставляючи (2) і (3) у формулу (1), отримаємо

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I}{2\pi} a \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{b+a} \right) = \frac{\mu_0 I_1 I a^2}{2\pi(a+b)b}.$$

Відповідь: $F = 5,69 \text{ мкН}$.

Задача 4. По коловому витку тече струм силою $I = 30 \text{ А}$. Напруженість магнітного поля в центрі витка $H = 100 \text{ А/м}$. Визначити магнітний момент витка.

Розв'язання

Магнітний момент колового витка зі струмом знаходимо із виразу

$$p_m = IS, \quad (1)$$

де $S = \pi R^2$ – площа витка, I – сила струму у витку.

Щоб знайти радіус витка, скористаємося виразом для напруженості магнітного поля у центрі витка

$$H = I/2R.$$

Звідки

$$R = I/2H. \quad (2)$$

Підставляючи в (1) площу витка S з урахуванням (2), знаходимо

$$p_m = \frac{\pi I^3}{4H^2}.$$

Відповідь: $p_m = 2,12 \text{ А} \cdot \text{м}^2$.

Задача 5. Застосовуючи теорему про циркуляцію вектора $\vec{B}$, визначити індукцію і напруженість магнітного поля на осі тороїда без осердя, який має $N = 300$ витків і по обмотці якого тече струм силою $I = 3 \text{ А}$. Зовнішній діаметр тороїда $D_1 = 40 \text{ см}$, внутрішній $D_2 = 30 \text{ см}$.

Розв'язання

Знайдемо радіус r середньої лінії тороїда

$$r = \frac{1}{2}(R_1 + R_2) = \frac{1}{4}(D_1 + D_2). \quad (1)$$

Обчислимо циркуляцію вектора $\vec{B}$ по контуру L , який являє собою коло радіусом r

$$\oint_L B_l dl = \int_0^{2\pi r} B dl = B \int_0^{2\pi r} dl = B \cdot 2\pi r. \quad (2)$$

Відповідно до теореми про циркуляцію вектора $\vec{B}$ ця циркуляція дорівнює алгебраїчній сумі струмів, які охоплюються контуром, помноженій на μ_0 , де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала, тобто

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum_{k=1}^n I_k. \quad (3)$$

Контур, що проходить уздовж середньої лінії тороїда, охоплює число струмів, яке дорівнює числу витків тороїда. Отже,

$$\sum_{k=1}^n I_k = NI. \quad (4)$$

Прирівнявши відповідно до теореми (3) вирази (2) і (4), маємо

$$B \cdot 2\pi r = \mu_0 NI,$$

звідки

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r}. \quad (5)$$

Напруженість магнітного поля H пов'язана з магнітною індукцією співвідношенням $B = \mu_0 H$. Тоді

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{NI}{2\pi r}. \quad (6)$$

З урахуванням (1) вирази (5) і (6) набувають вигляду

$$B = \frac{2\mu_0 NI}{\pi(D_1 + D_2)}, \quad H = \frac{2NI}{\pi(D_1 + D_2)}.$$

Відповідь: $B = 1,03$ мТл, $H = 0,82$ кА/м.

Задача 6. Кутова швидкість, з якою рухається електрон в однорідному магнітному полі по коловій орбіті, дорівнює $\omega = 3,52 \cdot 10^{10}$ рад/с. Визначити магнітну індукцію поля.

Розв'язання

На заряджену частинку, яка рухається в однорідному магнітному полі, діє сила Лоренца (магнітна сила).

$$\vec{F}_L = q[\vec{v}, \vec{B}], \quad (1)$$

де q – заряд частинки, $\vec{v}$ – її швидкість, $\vec{B}$ – магнітна індукція поля. В нашому випадку $q = e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Оскільки електрон рухається коловою орбітою, швидкість $\vec{v}$ електрона перпендикулярна магнітній індукції $\vec{B}$. Тому вираз (1) набуває вигляду

$$F_l = qvB. \quad (2)$$

Ця сила Лоренца надає електрону нормальне прискорення

$$a_n = v^2/r, \quad (3)$$

де r – радіус колової орбіти.

З урахуванням другого закону Ньютона

$$F_l = ma_n, \quad (4)$$

де $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг – маса електрона.

Тоді із виразів (2), (3) і (4) отримаємо рівняння

$$mv^2/r = evB,$$

звідси

$$B = \frac{mv}{er}, \quad (5)$$

оскільки

$$v = \omega r. \quad (6)$$

З (5) та (6) отримаємо

$$B = \frac{m}{e} \omega.$$

Відповідь: $B = 0,2$ Тл.

Задача 7. В однорідному магнітному полі напруженістю $H = 100$ кА/м знаходиться рамка у формі еліпса, велика піввісь якого дорівнює $a = 5$ см, а мала – $b = 3$ см. Площина рамки складає з напрямком магнітного поля кут $\beta = 30^\circ$. Визначити магнітний потік, який пронизує рамку.

Розв'язання

За визначенням магнітний потік, що пронизує плоску поверхню, якщо магнітне поле однорідне, дорівнює

$$\Phi = BS \cos \alpha, \quad (1)$$

де B – магнітна індукція, S – площа контуру, α – кут між перпендикуляром до контуру і напрямком магнітного поля.

З умови задачі

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \beta. \quad (2)$$

Індукція B і напруженість H магнітного поля у вакуумі зв'язані між собою співвідношенням:

$$B = \mu_0 H. \quad (3)$$

Площа еліпса дорівнює

$$S = \pi ab. \quad (4)$$

Тоді підставивши (3) і (4) у (1), з урахуванням (2), маємо

$$\Phi = \mu_0 H \pi ab \cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right).$$

Відповідь: $\Phi = 295,8$ мкВб.

Задача 8. Плоский коловий контур діаметром 8 см, яким тече струм силою $I = 20$ А, вільно підвішений в однорідному магнітному полі з напруженістю $H = 500$ кА/м. Визначити роботу, яку потрібно здійснити, щоб повернути контур на кут $\varphi = \pi/4$ відносно осі, яка збігається з діаметром кола.

Розв'язання

Момент сил, що діє в однорідному магнітному полі на контур зі струмом

$$\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}].$$

Його модуль визначається як

$$M = p_m B \sin \varphi, \quad (1)$$

де B – магнітна індукція поля, p_m – магнітний момент контуру, φ – кут між векторами $\vec{p}_m$ і $\vec{B}$.

Коли контур вільно встановлений у магнітному полі, кут $\varphi = 0$, і механічний момент теж дорівнює нулю, а вектори $\vec{p}_m$ і $\vec{B}$ збігаються. Якщо вивести контур із положення рівноваги, то механічний момент, який виникає при цьому, намагається повернути його у положення рівноваги. Отже, проти цього моменту здійснюватиметься робота зовнішніми силами

$$dA = M d\varphi.$$

З урахуванням формули (1) маємо

$$dA = p_m B \sin \varphi d\varphi.$$

Повна робота при повороті контуру на кут $\varphi = \pi/4$

$$A = \int_0^{\pi/4} p_m B \sin \varphi d\varphi = -p_m B \cos \varphi \Big|_0^{\pi/4} =$$
$$= -p_m B (\cos(\pi/4) - \cos(0)) = -p_m B \left(\frac{\sqrt{2}}{2} - 1 \right). \quad (2)$$

Магнітний момент контуру

$$p_m = IS = I \frac{\pi d^2}{4}. \quad (3)$$

Магнітна індукція

$$B = \mu_0 H. \quad (4)$$

Отже, з урахуванням (3) і (4) вираз (2) набуває вигляду

$$A = \frac{I \pi d^2}{4} \mu_0 H \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2} \right).$$

Відповідь: $A = 18,5 \text{ мДж}$.

Задача 9. Котушка без осердя діаметром $D = 10 \text{ см}$ і довжиною $l = 40 \text{ см}$ має $N = 800$ витків. На котушку надіте кільце з мідного дроту, діаметр якого можна вважати рівним діаметру котушки. Площа поперечного перерізу мідного дроту ($\rho = 17 \text{ нОм} \cdot \text{м}$) дорівнює $S_1 = 2 \text{ мм}^2$. Струм у котушці за допомогою реостата рівномірно збільшується на $0,1 \text{ А}$ за секунду. Вважаючи, що магнітні потоки, які пронизують котушку і кільце в будь-який момент часу, однакові, знайти струм у кільці.

Розв'язання

Величину струму індукції $I_{\text{інд}}$ у кільці можна знайти за законом Ома

$$I_{\text{інд}} = \varepsilon_{\text{інд}} / R, \quad (1)$$

де $\varepsilon_{\text{інд}}$ – ЕРС індукції у кільці, R – опір кільця.

За законом Фарадея ЕРС у кільці дорівнює

$$\varepsilon_{\text{інд}} = -d\psi/dt,$$

де ψ – повний магнітний потік крізь котушку.

Величину повного магнітного потоку крізь котушку знайдемо за формулою

$$\psi = N \cdot B \cdot S = \mu_0 \mu \frac{N^2 S}{l} I,$$

де $\mu = 1$, $S = \pi D^2/4$ – площа поперечного перерізу котушки, I – сила струму у котушці.

Таким чином, ЕРС індукції у кільці

$$\varepsilon_{ind} = -\mu_0 \frac{N^2}{l} \frac{\pi D^2}{4} \frac{dI}{dt}, \quad (2)$$

де $\frac{dI}{dt}$ – швидкість зміни струму у котушці.

Опір кільця

$$R = \rho \frac{l_\partial}{S_\partial}, \quad (3)$$

де ρ – питомий опір міді ($\rho = 17 \text{ нОм} \cdot \text{м}$), l_∂ – довжина дроту кільця, S_∂ – площа поперечного перерізу дроту, з якого виготовлене кільце. Враховуючи, що $l_\partial = \pi D$, маємо

$$R = \rho \frac{\pi D}{S_\partial}. \quad (4)$$

Тоді з урахуванням (2), (3) і (4) вираз (1) набуває вигляду

$$I_{ind} = -\frac{\mu_0 N^2 D S_\partial}{4 \rho l} \frac{dI}{dt}.$$

Відповідь: $I_{ind} = -0,59 \text{ А}$.

Примітка

Знак мінус, який має місце, пояснюється правилом Ленца. Зростання струму у котушці призводить до зростання магнітного потоку поля котушки, а струм індукції у кільці тече у такому напрямку, щоб створене магнітне поле індукovanого струму послабляло підсилення поля котушки. У цьому полягає істотний фізичний зміст знаку мінус в індукovanому струмі кільця.

Задача 10. Результуюча сила струмів, яка протікає по усім виткам соленоїду малого діаметра довжиною $l = 60 \text{ см}$, дорівнює $I = 600 \text{ А}$. Знайти об'ємну густину енергії магнітного поля і магнітну індукцію усередині соленоїда.

Розв'язання

Результуюча сила струмів, яка протікає по усім виткам соленоїду, дорівнює циркуляції вектора напруженості магнітного поля $\vec{H}$ по замкненому контуру l , що охоплює струми, котрі створюють магнітне поле:

$$I = \oint_l (\vec{H} d\vec{l}) = \oint_l H_l dl, \quad (1)$$

де dl – елемент контуру інтегрування.

Оскільки $H_l = H$, то вираз (1) має вигляд

$$I = Hl.$$

Звідси

$$H = I/l. \quad (2)$$

Об'ємна густина енергії магнітного поля

$$w = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2}. \quad (3)$$

Оскільки $\mu = 1$, то вираз (3) з урахуванням (2) має вигляд

$$w = \frac{\mu_0 I^2}{2l^2}.$$

Магнітна індукція і напруженість магнітного поля зв'язані співвідношенням

$$B = \mu_0 H,$$

або з урахуванням (2)

$$B = \mu_0 \frac{I}{l}.$$

Відповідь: $w = 0,628 \text{ Дж/м}^3$, $B = 1,256 \text{ мТл}$.

Задача 11. Коливальний контур складається з конденсатора з двома пластинами площею $S = 10 \text{ см}^2$ кожна, які знаходяться на відстані $d = 0,7 \text{ мм}$ одна від одної, і котушки індуктивністю $L = 1 \text{ мкГн}$. Простір між пластинами конденсатора заповнений діелектриком. Коливальний контур має резонанс на довжині хвилі $\lambda = 17,73 \text{ м}$. Визначити діелектричну проникність ε середовища, яке заповнює конденсатор.

Розв'язання

Діелектричну проникність середовища, яке заповнює конденсатор, можна визначити з формули електроємності плоского конденсатора $C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}$

$$\varepsilon = \frac{Cd}{\varepsilon_0 S}. \quad (1)$$

Електроємність конденсатора знайдемо з формули Томсона $T = 2\pi\sqrt{LC}$, яка визначає період коливань в електричному контурі:

$$C = \frac{T^2}{4\pi^2 L}. \quad (2)$$

Щоб знайти період коливань, скористаємось співвідношенням $\lambda = cT$, що зв'язує довжину хвилі λ , на якій резонує контур, з періодом коливань T контуру (тут c – швидкість світла).

$$T = \lambda / c. \quad (3)$$

Підставивши (3) в (2), а потім електроємність C у формулу (1), отримаємо

$$\varepsilon = \frac{\lambda^2 d}{4\pi^2 c^2 \varepsilon_0 L S}.$$

Відповідь: $\varepsilon = 7$.

Задача 12. В середовищі з діелектричною проникністю $\varepsilon = 100$ і магнітною $\mu = 1$ розповсюджується електромагнітна хвиля з частотою $\nu = 3$ ГГц. Знайти вектор Пойнтінга і його середнє значення за період у тій точці, де електричний вектор змінюється за законом $\vec{E} = E_m \cos(\omega t + \alpha) \vec{e}_z$. Амплітуда вектора $\vec{H}$ має вигляд $H_m \vec{e}_x$. Амплітуда електричного поля $E_m = 20$ В/м.

Розв'язання

Оскільки коливання електричного і магнітного векторів в електромагнітній хвилі відбуваються з однаковою фазою, то рівняння плоскої хвилі для вектора $\vec{H}$ має вигляд

$$\vec{H} = H_m \cos(\omega t + \alpha) \vec{e}_x.$$

У фіксованій точці простору вектори $\vec{E}$ і $\vec{H}$ змінюються за гармонічним законом і утворюють з напрямком розповсюдження хвилі правоґвинтову систему. У нашому випадку вектор $\vec{E}$ коливається уздовж осі z , а вектор $\vec{H}$ – уздовж осі x , хвиля розповсюджується уздовж осі y , отже, і вектор Пойнтінга теж спрямований уздовж осі y .

Амплітуди напруженостей електричного і магнітного полів пов'язані співвідношенням

$$E_m \sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon} = H_m \sqrt{\mu_0 \mu}, \quad (1)$$

де ε_0 і μ_0 – електрична і магнітна сталі відповідно.

З виразу (1) випливає, що

$$H_m = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\mu_0 \mu}} E_m. \quad (2)$$

Оскільки $\mu = 1$, а $\sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = \rho = 377 \text{ Ом}$, то вираз (2) набуває вигляду

$$H_m = E_m \frac{\sqrt{\epsilon}}{\rho}. \quad (3)$$

Підставимо вирази для векторів $\vec{E}$ і $\vec{H}$ у формулу, яка визначає вектор Пойнтінга, з урахуванням співвідношення (3)

$$\begin{aligned} \vec{S} &= [\vec{E}, \vec{H}] = [E_m \cos(\omega t + \alpha) \vec{e}_z, H_m \cos(\omega t + \alpha) \vec{e}_x] = \\ &= E_m H_m \cos^2(\omega t + \alpha) [\vec{e}_z, \vec{e}_x] = \frac{E_m^2 \sqrt{\epsilon} \cos^2(\omega t + \alpha) [\vec{e}_z, \vec{e}_x]}{\rho}. \end{aligned} \quad (4)$$

Оскільки $[\vec{e}_z, \vec{e}_x] = \vec{e}_y$, то вираз (4) набуває вигляду

$$\vec{S} = \frac{\sqrt{\epsilon}}{\rho} E_m^2 \cos^2(\omega t + \alpha) \vec{e}_y. \quad (5)$$

Враховуючи, що $\omega = 2\pi\nu$, і підставивши числові значення у (5), маємо

$$\vec{S} = 10,6 \cos^2(18,84 \cdot 10^9 t + \alpha) \vec{e}_y.$$

Знайдемо середнє значення модуля вектора Пойнтінга за період, враховуючи, що середнє значення функції $\cos^2(\omega t + \alpha)$ за період дорівнює 0,5.

Відповідь: $\langle |\vec{S}| \rangle = 5,3 \text{ Вт/м}^2$.

1.6 Задачі для самостійного розв'язання

1.1 Коловим витком радіуса $R = 150 \text{ мм}$ тече струм силою $I = 2 \text{ А}$. Знайти значення магнітної індукції B : а) у центрі витка; б) на осі витка на відстані $b = 150 \text{ мм}$ від його центра.

Відповідь: а) $B = 5,3 \cdot 10^{-6} \text{ Тл}$; б) $B = 2,97 \cdot 10^{-6} \text{ Тл}$.

1.2 Знайти магнітну індукцію B поля, що утворюється двома протилежно спрямованими струмами силою $I = 5 \text{ А}$ кожен, які протікають прямолінійними провідниками, що знаходяться на відстані $r = 10 \text{ см}$ один від одного, у точці посередині між цими провідниками.

Відповідь: $B = 4 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$.

1.3 Двома нескінченно довгими взаємно перпендикулярними провідниками протікають струми силою $I = 20 \text{ А}$ кожен. Відстань між ними

дорівнює $r = 10$ см. Визначити значення магнітної індукції B поля у точці, яка розташована посередині між провідниками. Напрямки струмів наведені на рис. 1.6.

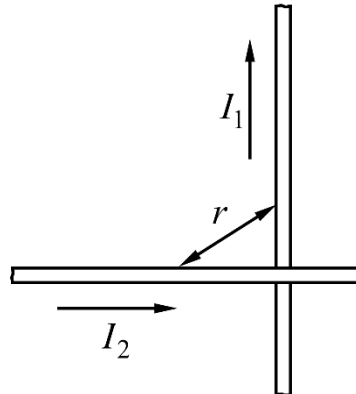


Рисунок 1.6

Відповідь: $B = 113$ мкТл.

1.4 Два паралельних нескінченно довгих провідники, якими протікають в одному напрямку струми силою $I = 20$ А, розташовані на відстані $d = 10$ см. Визначити магнітну індукцію B у точці, що рівновіддалена від кожного із струмів і знаходиться на відстані $l = 20$ см від прямої, що з'єднує ці два струми.

Відповідь: $B = 37$ мкТл.

1.5 По двох паралельних нескінченно довгих провідниках, що розташовані на відстані $d = 10$ см, протікають однакові струми в одному напрямку. У точці, яка знаходиться на відстані $l_1 = 5$ см від одного провідника, та $l_2 = 12$ см від другого, магнітна індукція $B = 286$ мкТл. Визначити силу струму у провідниках.

Відповідь: $I = 60$ А.

1.6 По замкненому колу, яке включає прямолінійну ділянку довжиною $l = 40$ см, протікає струм силою $I = 10$ А. До середини цієї ділянки проведений перпендикуляр. У деякій точці P , що знаходиться на цьому перпендикулярі, магнітна індукція $B = 17,7$ мкТл. Знайти відстань до цієї точки від ділянки кола.

Відповідь: $d = 10$ см.

1.7 Провідником, який зігнутий у вигляді шестикутника та вписаний у коло радіусом $R=10$ см, протікає струм силою $I=10$ А. Знайти магнітну індукцію B у центрі шестикутника.

Відповідь: $B = 69$ мкТл.

1.8 Знайти силу струму, що циркулює у контурі у вигляді рівнобічної трапеції, відношення основ якої дорівнює 2. Магнітна індукція у точці A дорівнює $B=8,9$ мкТл. Відстань до цієї точки до меншої основи $b=50$ мм (рис. 1.7), менша основа трапеції $l=100$ мм.

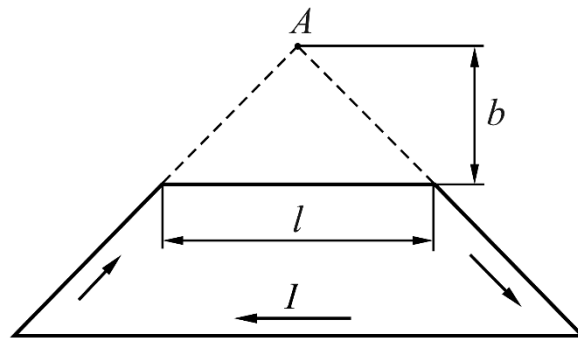


Рисунок 1.7

Відповідь: $I = 6,28$ А.

1.9 Провідник у формі квадрата, вписаний у коло радіусом $R=20$ см. По ньому протікає струм силою $I=10$ А. Знайти магнітну індукцію B у його центрі.

Відповідь: $B = 40$ мкТл.

1.10 Провідником, який зігнутий у вигляді правильного трикутника, вписаного у коло радіусом $R=10$ см, протікає струм силою $I=20$ А. Знайти магнітну індукцію B у центрі трикутника.

Відповідь: $B = 207$ мкТл.

1.11 Два нескінченно довгих прямих паралельних провідники знаходяться на відстані $d=20$ см один від одного. Цими провідниками протікають струми з силою $I_1=40$ А і $I_2=60$ А в одному напрямку. Обчислити магнітну індукцію B у точці, яка рівновіддалена на однакову відстань $r=10$ см від обох провідників.

Відповідь: $B = 174$ мкТл.

1.12 По тонкому металевому кільцю протікає струм силою $I = 80 \text{ А}$. Магнітна індукція у точці, рівновіддаленій від усіх точок кільця на відстань $r = 20 \text{ см}$, дорівнює $B = 6,28 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$. Знайти радіус кільця.

Відповідь: $R = 10 \text{ см}$.

1.13 По тонкому кільцю радіусом $R = 20 \text{ см}$ протікає струм $I = 160 \text{ А}$. Знайти магнітну індукцію B у точці, що знаходиться на осі, перпендикулярній площині кільця і проведеної через його центр, на відстані $l = 20 \text{ см}$.

Відповідь: $B = 178 \text{ мкТл}$.

1.14 Довгий провідник зі струмом силою $I = 50 \text{ А}$ вигнутий під деяким кутом α так, як показано на рис. 1.8. Магнітна індукція у точці A , що знаходиться від точки вигину на відстані $d = 5 \text{ см}$, дорівнює $B = 34,6 \text{ мкТл}$. Визначити кут α .

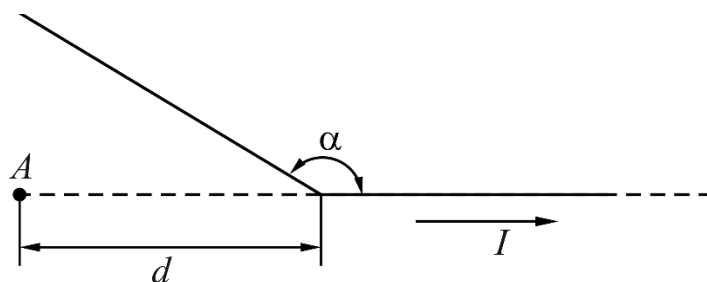


Рисунок 1.8

Відповідь: $\alpha = 120^\circ$.

1.15 Квадратний контур площею $S = 10 \text{ см}^2$ розташували в однорідному магнітному полі так, що перпендикуляр до площини контуру складає з напрямком вектора магнітної індукції кут $\alpha = 30^\circ$. Магнітна індукція поля $B = 0,2 \text{ Тл}$. Сила струму у рамці $I = 0,5 \text{ А}$. Визначити обертальний момент, який діє на цю рамку.

Відповідь: $M = 50 \text{ мкН} \cdot \text{м}$.

1.16 Нескінченно довгий провідник вигнутий так, як показано на рис. 1.9. По ньому тече струм $I = 80 \text{ А}$. У точці O магнітна індукція $B = 331 \text{ мкТл}$. Визначити радіус R дуги кола.

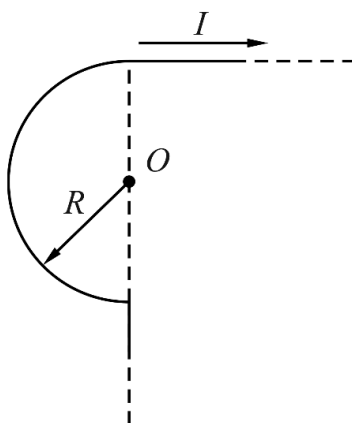


Рисунок 1.9

Відповідь: $R = 10$ см.

1.17 По тонкому провіднику у формі кільця протікає струм. У точці, що знаходиться на осі, перпендикулярній до площини кільця, на відстані $d = 10$ см від його центра, магнітна індукція $B = 11,2$ мкТл. Визначити силу струму, якщо радіус кільця $R = 5$ см.

Відповідь: $I = 10$ А.

1.18 Струм протікає по нескінченно довгому провіднику. Відрізок цього провідника довжиною $l = 20$ см створює у точці, яка знаходиться на рівних відстанях від кінців відрізка і на відстані $R = 4$ см від його середини, магнітну індукцію $B = 46,4$ мкТл. Знайти силу струму I .

Відповідь: $I = 10$ А.

1.19 По провіднику у вигляді тонкого кільця радіусом $R = 20$ см протікає струм. Чому дорівнює сила струму I , якщо в точці A магнітна індукція $B = 0,5$ мкТл. Кут $\beta = 30^\circ$. Вісь OA перпендикулярна до площини кільця (див. рис. 1.10).

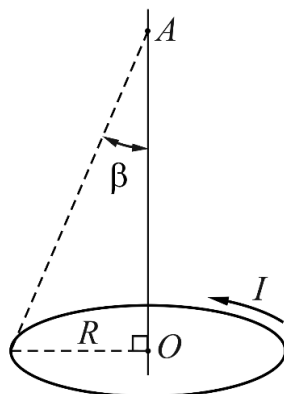


Рисунок 1.10

Відповідь: $I = 127$ А.

1.20 Яке значення має індукція магнітного поля в точці O , якщо радіус дуги дорівнює $R = 10$ м, кут $\alpha = 60^\circ$, сила струму у контурі ABC , $I = 20$ А (див. рис. 1.11)?

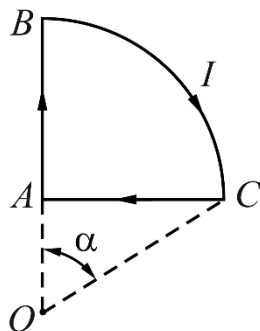


Рисунок 1.11

Відповідь: $B = 13,6$ мкТл.

1.21 Сила взаємодії двох однакових плоских контурів у формі квадратів, якими проходять однакові струми, $F = 192$ мН. Відстань між відповідними сторонами контурів $d = 1$ мм. Сторона квадрата $a = 30$ см. Визначити силу струму.

Відповідь: $I = 20$ А.

1.22 Довгий прямий провідник і квадратна рамка з дроту розміщені в одній площині так, що дві її сторони паралельні провіднику. По рамці і провіднику проходять однакові струми. Найближча до провідника сторона рамки знаходиться на відстані, яка дорівнює її довжині. Сила взаємодії між рамкою і провідником $F = 0,4$ Н. Знайти силу струмів.

Відповідь: $I = 2000$ А.

1.23 Двома паралельними провідниками, довжиною $l = 1,2$ м кожен, проходять струми однакової сили $I = 4,6$ А. Відстань між провідниками дорівнює $d = 1$ см. Знайти силу взаємодії струмів між собою.

Відповідь: $F = 0,5$ мН.

1.24 Два тонкі провідники у формі кільця, радіусом $R = 20$ см кожне, знаходяться у паралельних площинах, відстань між якими $d = 2$ мм. Провідниками проходять однакові струми. Сила взаємодії між ними $F = 28,2$ мН. Знайти силу струмів у провідниках.

Відповідь: $I = 15$ А.

1.25 Провідник у формі кільця радіусом $R = 3,19$ см розміщений в однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,1$ Тл. Площина кільця складає кут $\alpha = 45^\circ$ з напрямком магнітного поля. Провідником протікає струм. Внаслідок взаємодії кільця з магнітним полем на кільце діє обертальний момент $M = 4,5 \cdot 10^{-4}$ Н·м. Знайти силу струму у кільці.

Відповідь: $I = 2$ А.

1.26 Провідник у формі квадрату зі стороною $a = 5$ см, розміщений у магнітному однорідному полі з індукцією $B = 0,1$ Тл. Площина квадрату складає деякий кут α з напрямком магнітного поля. По ньому протікає струм $I = 2$ А. Знайти цей кут, якщо на контур діє обертальний момент $M = 3,53 \cdot 10^{-4}$ Н·м.

Відповідь: $\alpha = 45^\circ$.

1.27 Два паралельні прямі провідники довжиною $l = 3$ м кожен знаходяться на відстані $d = 15$ см. Струми в провідниках однакові за величиною. Визначити ці струми, якщо сила взаємодії між провідниками $F = 64$ Н.

Відповідь: $I_1 = I_2 = 4$ кА.

1.28 Двома довгими паралельними провідниками протікають струми в одному напрямку $I_1 = 5$ А і $I_2 = 10$ А. Провідники, які спочатку знаходяться на відстані $d_1 = 15$ см, розсовують до відстані $d_2 = 30$ см. Яка робота на одиницю довжини провідника при цьому виконується?

Відповідь: $A/l = 6,98 \cdot 10^{-7}$ Дж/м.

1.29 На провідник зі струмом $I = 70$ А, який розташовано перпендикулярно силовим лініям однорідного магнітного поля, діє сила $F = 4,9$ Н. Визначити довжину l цього провідника, якщо індукція магнітного поля $B = 0,1$ Тл.

Відповідь: $l = 70$ см.

1.30 У скільки разів потрібно збільшити відстань між двома прямолінійними паралельними провідниками, якими протікають струми

в одному напрямку і однієї величини $I_1 = I_2 = 20 \text{ А}$, щоб здійснена при цьому робота на одиницю довжини провідника складала $A/l = 5,5 \cdot 10^{-5} \text{ Дж/м}$?

Відповідь: вдвічі.

1.31 Напруженість магнітного поля в центрі колового витка $H = 100 \text{ А/м}$. Магнітний момент витка $p_m = 1 \text{ А} \cdot \text{м}^2$. Обчислити силу струму у витку.

Відповідь: $I = 23,4 \text{ А}$.

1.32 Магнітний момент кільця зі струмом $p_m = 50 \text{ мА} \cdot \text{м}^2$. На осі кільця на деякій відстані d від його площини магнітна індукція $B = 10 \text{ нТл}$. Визначити цю відстань за умови, що радіус кільця R набагато менший відстані d .

Відповідь: $d = 1 \text{ м}$.

1.33 Знайти магнітний момент тонкого кільця радіусом $R = 5 \text{ см}$, на якому рівномірно розподілений заряд $q = 100 \text{ нКл}$, відносно осі, що збігається з одним із діаметрів кільця, якщо кільце рівномірно обертається з частотою $\nu = 10 \text{ с}^{-1}$.

Відповідь: $p_m = 3,92 \text{ нА} \cdot \text{м}^2$.

1.34 Магнітний момент колового витка $p_m = 1 \text{ А} \cdot \text{м}^2$. Сила струму у витку $I = 37 \text{ А}$. Знайти напруженість H магнітного поля в центрі витка.

Відповідь: $H = 200 \text{ А/м}$.

1.35 Напруженість магнітного поля у центрі колового витка зі струмом $H = 150 \text{ А/м}$, а магнітний момент $p_m = 0,75 \text{ А} \cdot \text{м}^2$. Обчисліть радіус витка.

Відповідь: $R = 9,25 \text{ см}$.

1.36 Радіус колового витка, яким протікає струм, $R = 10 \text{ см}$. Напруженість магнітного поля в його центрі $H = 100 \text{ А/м}$. Знайти магнітний момент витка.

Відповідь: $p_m = 0,628 \text{ А} \cdot \text{м}^2$.

1.37 Сила струму в коловому витку $I = 40 \text{ А}$. Напруженість магнітного поля в центрі цього витка $H = 100 \text{ А/м}$. Знайти магнітний момент p_m витка.

Відповідь: $p_m = 5,02 \text{ А} \cdot \text{м}^2$.

1.38 По кільцю протікає струм. Магнітна індукція на осі кільця на відстані $d = 80$ см від його площини $B = 20$ нТл. Вважаючи, що радіус кільця R набагато менший відстані d , визначити магнітний момент кільця зі струмом.

Відповідь: $p_m = 51,2 \text{ А} \cdot \text{м}^2$.

1.39 По тонкому стрижню довжиною $l = 10$ см рівномірно розподілений заряд q . Стрижень обертається з кутовою швидкістю $\omega = 10$ рад/с відносно осі, перпендикулярної стрижню, і такою, що проходить через його середину. Магнітний момент, обумовлений обертанням зарядженого стрижня, $p_m = 5 \text{ нА} \cdot \text{м}^2$. Визначити величину заряду q .

Відповідь: $q = 120 \text{ мкКл}$.

1.40 Тонке кільце радіусом $R = 10$ см рівномірно обертається відносно осі, яка проходить через його центр перпендикулярно площині кільця. По кільцю рівномірно розподілений заряд $q = 5 \text{ нКл}$. Знайти частоту обертання кільця, якщо магнітний момент колового струму, що створюється кільцем, $p_m = 3,14 \text{ нА} \cdot \text{м}^2$.

Відповідь: $\nu = 20 \text{ с}^{-1}$.

1.41 На кінцях обмотки соленоїда довжиною $l = 60$ см напруга $U = 120 \text{ В}$. Магнітна індукція усередині соленоїда $B = 2 \text{ мТл}$. Знайти опір R обмотки соленоїда, якщо він має 1000 витків.

Відповідь: $R = 125,6 \text{ Ом}$.

1.42 Соленоїд має 500 витків. Напруга на кінцях обмотки соленоїда $U = 120 \text{ В}$, а її опір $R = 120 \text{ Ом}$. Обчислити довжину соленоїда, якщо магнітна індукція поля усередині нього $B = 3,14 \text{ мТл}$.

Відповідь: $l = 20 \text{ см}$.

1.43 У точці, розташованій на відстані $d = 15$ см від прямого нескінченно довгого провідника, магнітна індукція поля $B = 30 \text{ мкТл}$. Визначити силу струму в цьому провіднику, використовуючи теорему про циркуляцію вектора $\vec{B}$.

Відповідь: $I = 22,5 \text{ А}$.

1.44 На кінцях обмотки соленоїда різниця потенціалів $U = 4 \text{ В}$. Соленоїд виготовлений з мідного провідника ($\rho = 17 \text{ нОм} \cdot \text{м}$) діаметром $d = 1 \text{ мм}$. Довжина соленоїда $l = 0,5 \text{ м}$, діаметр $D = 6 \text{ см}$. Визначити напруженість магнітного поля у соленоїді.

Відповідь: $H = 1,96 \text{ кА/м}$.

1.45 Визначити питомий опір ρ провідника, з якого виготовлений соленоїд довжиною $l = 50 \text{ см}$ і діаметром $D = 4 \text{ см}$, якщо в ньому створене магнітне поле напруженістю $H = 1 \text{ кА/м}$ і різницею потенціалів на кінцях обмотки $U = 2,08 \text{ В}$. Діаметр дроту $d = 1 \text{ мм}$.

Відповідь: $\rho = 26 \text{ нОм} \cdot \text{м}$.

1.46 Соленоїд довжиною $l = 45 \text{ см}$ і діаметром $D = 5 \text{ см}$ виготовлений із залізного провідника діаметром $d = 1,2 \text{ мм}$. У соленоїді створюється магнітне поле з напруженістю $H = 1 \text{ кА/м}$. Визначити різницю потенціалів U на кінцях обмотки соленоїда. Питомий опір заліза $\rho = 98 \text{ нОм} \cdot \text{м}$.

Відповідь: $U = 6,13 \text{ В}$.

1.47 Обчислити циркуляцію вектора індукції уздовж контуру, який охоплює струми $I_1 = 25 \text{ А}$, $I_2 = 15 \text{ А}$, що течуть в одному напрямку, і $I_3 = 5 \text{ А}$, $I_4 = 10 \text{ А}$, які течуть у протилежному напрямку.

Відповідь: $31,4 \text{ мкТл} \cdot \text{м}$.

1.48 Циркуляція вектора напруженості H магнітного поля уздовж кола радіусом $R = 4 \text{ мм}$, яке проходить усередині провідника і орієнтоване так, що його площа складає кут φ з вектором густини струму, дорівнює $25,12 \text{ А}$. Знайти кут φ , якщо густина струму $j = 1 \text{ МА/м}^2$ рівномірно розподілена по перерізу провідника.

Відповідь: $\varphi = 30^\circ$.

1.49 По перерізу провідника рівномірно розподілений струм густиною $j = 1,5 \text{ МА/м}^2$. Знайти циркуляцію вектора напруженості H уздовж контуру у вигляді квадрата зі стороною $a = 5 \text{ мм}$, який проходить у середині провідника

і орієнтований так, що його площа складає кут $\alpha = 30^\circ$ з вектором густини струму.

Відповідь: 18,75 А.

1.50 Знайти циркуляцію вектора напруженості H уздовж контуру у вигляді еліпса з великою віссю $a = 6$ мм і малою віссю $b = 4$ мм, який проходить у середині провідника і орієнтований так, що його площа складає кут $\alpha = 45^\circ$ з вектором густини струму. Струм по перерізу провідника розподілений рівномірно з густиною $j = 1$ МА/м².

Відповідь: 53,3 А.

1.51 Частота обертання електрона по коловій орбіті в магнітному полі $\nu = 562$ МГц. Визначити індукцію B магнітного поля.

Відповідь: $B = 0,2$ Тл.

1.52 Заряджена частинка, що має питомий заряд $q/m = 96,3$ МКл/кг, влетіла в однорідне магнітне поле з індукцією $B = 0,52$ Тл і описала дугу кола радіусом $R = 4$ см. Визначити швидкість цієї частинки.

Відповідь: $v = 2,0 \cdot 10^6$ м/с.

1.53 На заряджену частинку з енергією $T = 1$ кеВ, що рухається в однорідному магнітному полі по колу радіусом R , діє сила $F = 0,32$ пН. Знайти радіус кола.

Відповідь: $R = 1$ мм.

1.54 Протон, що пройшов прискорюючу різницю потенціалів U і влетів у однорідне магнітне поле з індукцією $B = 0,3$ Тл, рухається по колу радіусом $R = 12$ мм. Визначити цю різницю потенціалів.

Відповідь: $U = 621$ В.

1.55 Заряджена частинка рухається прямолінійно, не відхиляючись, по траєкторії, перпендикулярній схрещеним під прямим кутом електричному і магнітному полям. Індукція магнітного поля $B = 0,1$ Тл. Швидкість частинки $V = 1$ Мм/с. Визначити напруженість E електричного поля.

Відповідь: $E = 100$ кВ/м.

1.56 Електрон рухається колом в однорідному магнітному полі. Період обертання електрона $T = 2,84$ нс. Визначити напруженість H магнітного поля.

Відповідь: $H = 10$ кА/м.

1.57 Знайти період обертання електрона, що рухається в однорідному магнітному полі, індукція якого дорівнює $B = 0,01$ Тл.

Відповідь: $T = 3,57$ нс.

1.58 На електрон, що рухається в однорідному магнітному полі перпендикулярно лініям індукції по колу радіусом $R = 0,6$ см, діє сила $F = 2$ пН. Визначити індукцію магнітного поля B .

Відповідь: $B = 0,11$ Тл.

1.59 Кутова швидкість електрона, що рухається в однорідному магнітному полі, $\omega = 2,5 \cdot 10^{10}$ рад/с. Визначити індукцію магнітного поля.

Відповідь: $B = 0,14$ Тл.

1.60 В однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,2$ Тл обертається коловою орбітою заряджена частинка. Частота обертання $\nu = 5,62$ ГГц. Визначити питомий заряд q/m частинки. Яка це частинка?

Відповідь: $q/m = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.

1.61 Плоский контур у вигляді витка радіусом $R = 4$ см знаходиться в однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,04$ Тл. Визначити магнітний потік Φ через контур, якщо його площа складає кут $\beta = 60^\circ$ з лініями індукції.

Відповідь: $\Phi = 174,1$ мкВб.

1.62 Соленоїд довжиною $l = 0,8$ м та площею перерізу $S = 10$ см² містить 1800 витків. Визначити потокозчеплення із силою струму $I = 4$ А в обмотці.

Відповідь: $\Psi = 20,4$ мВб.

1.63 Квадратна рамка зі стороною $a = 8 \text{ см}$ знаходиться в однорідному магнітному полі з напруженістю $H = 8 \cdot 10^4 \text{ А/м}$. Нормаль до цієї рамки складає з напрямком магнітного поля кут $\alpha = 60^\circ$. Визначити магнітний потік через контур.

Відповідь: $\Phi = 321,5 \text{ мкВб}$.

1.64 Квадратна рамка розміщена в одній площині з довгим прямим провідником так, що відстань від провідника до її найближчої сторони дорівнює довжині сторони квадрата. Потім рамку віддалили від початкового положення в тій самій площині на відстань, яка дорівнює стороні квадрата. У скільки разів зменшиться при цьому потік магнітної індукції, який пронизує рамку?

Відповідь: $\Phi_1 / \Phi_2 = 1,71$.

1.65 У площині з довгим прямим провідником зі струмом $I = 30 \text{ А}$, розміщена прямокутна рамка так, що дві великі її сторони довжиною $l = 60 \text{ см}$ паралельні провіднику, а відстань від провідника до найближчої із сторін дорівнює її ширині. Знайти магнітний потік, який пронизує рамку.

Відповідь: $\Phi = 2,5 \text{ мкВб}$.

1.66 Дипольний момент соленоїда без осердя $p_m = 0,2 \text{ А} \cdot \text{м}^2$, його довжина $l = 15 \text{ см}$. Знайти потік Φ магнітної індукції через площу поперечного перерізу соленоїда.

Відповідь: $\Phi = 1,675 \text{ мкВб}$.

1.67 У магнітному полі з індукцією $B = 25 \text{ мТл}$ обертається стрижень. Вісь обертання паралельна силовим лініям магнітного поля і проходить через один з кінців стрижня. Потік магнітної індукції, що перетинається стрижнем при кожному оберті, дорівнює $\Phi = 314 \text{ мВб}$. Знайти довжину стрижня.

Відповідь: $l = 2 \text{ м}$.

1.68 Напруженість однорідного магнітного поля усередині соленоїда з осердям, магнітна проникність якого $\mu = 200$, дорівнює $H = 15 \text{ кА/м}$. Діаметр колового поперечного перерізу соленоїда $D = 4 \text{ см}$. Повний магнітний потік через соленоїд дорівнює $\Psi = 0,611 \text{ Вб}$. Знайти кількість витків соленоїда.

Відповідь: $N = 129$.

1.69 Потік магнітної індукції, який перетинається стрижнем при його кожному оберті навколо осі, що проходить через один з кінців стрижня паралельно силовим лініям магнітного поля, дорівнює $\Phi = 200$ мВб. Довжина стрижня $l = 50$ см. Знайти напруженість H магнітного поля.

Відповідь: $H = 203$ кА/м.

1.70 У магнітному полі, індукція якого $B = 0,06$ Тл, обертається стрижень довжиною $l = 1,5$ м. Силові лінії магнітного поля паралельні осі обертання, яка проходить через один з кінців стрижня. Знайти потік Φ магнітної індукції, який перетинається стрижнем при кожному оберті.

Відповідь: $\Phi = 0,424$ Вб.

1.71 На відстані $l = 15$ см від довгого прямого провідника знаходиться найближча до нього сторона квадратної рамки, якою проходить струм силою $I_1 = 20$ А. Сторона рамки $a = 30$ см. Провідником протікає струм силою $I = 2$ А. Визначити роботу сил поля A під час переміщення рамки в область простору, де магнітне поле відсутнє.

Відповідь: $A = 2,64$ мкДж.

1.72 Коловий провідний контур з діаметром $D = 0,2$ м і струмом $I = 20$ А вільно підвішений в однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,1$ Тл. Визначити роботу, яку необхідно здійснити, щоб повернути контур на 90° навколо осі, яка перпендикулярна напрямку магнітного поля.

Відповідь: $A = 62,8$ мДж.

1.73 В однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,1$ Тл розташований прямий провідник довжиною $l = 20$ см зі струмом. Провідник перпендикулярний до ліній магнітної індукції. Під дією сил поля провідник перемістився на $d = 2$ см, робота сил поля $A = 2$ мДж. Знайти силу струму.

Відповідь: $I = 5$ А.

1.74 Провідний виток радіусом $R = 5$ см зі струмом $I = 1$ А знаходиться у магнітному полі. Площина контуру перпендикулярна напрямку поля. Контур повертають на кут $\varphi = \pi/2$ навколо осі, яка збігається з діаметром витка.

При цьому здійснюється робота $A = 98,7$ мкДж. Визначити напруженість H магнітного поля.

Відповідь: $H = 10$ кА/м.

1.75 По коловому провідному витку тече струм силою $I = 10$ А. Виток вільно встановився в однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,2$ Тл. Щоб повернути контур на 180° навколо осі, що збігається з діаметром витка, потрібно здійснити роботу $A = 31,4$ мДж. Знайти діаметр витка.

Відповідь: $D = 10$ см.

1.76 Плоский контур у вигляді квадрата з довжиною сторони $a = 10$ см знаходиться в однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,02$ Тл. Площина контуру перпендикулярна лініям індукції. У контурі протікає постійний струм силою $I = 5$ А. Визначити роботу A зовнішніх сил переміщення контуру в область простору, в якій магнітне поле відсутнє.

Відповідь: $A = 1$ мДж.

1.77 В однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,04$ Тл знаходиться прямий провідник довжиною $l = 6$ см. Провідником тече струм $I = 1$ А. Під дією сил поля провідник перемістився на відстань $d = 8$ см. Знайти роботу A сил поля.

Відповідь: $A = 1,92$ мкДж.

1.78 Робота зовнішніх сил з переміщення колового контуру радіусом R у магнітному однорідному полі з індукцією $B = 0,05$ Тл в область простору, де поле відсутнє, дорівнює $A = 31,4$ мДж. У контурі протікає струм силою $I = 5$ А. Знайти радіус колового контуру.

Відповідь: $R = 20$ см.

1.79 В однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,1$ Тл знаходиться квадратний провідний контур зі стороною $a = 10$ см і струмом $I = 20$ А. Площина квадрата складає з напрямком поля кут φ . Робота видалення контуру за межі поля $A = 0,01$ Дж. Знайти кут φ .

Відповідь: $\varphi = 30^\circ$.

1.80 Квадратний провідний контур зі стороною $a = 10$ см і струмом $I = 10$ А вільно підвішений в однорідному магнітному полі. Контур повернули на кут $\varphi = 180^\circ$ навколо осі, що перпендикулярна напрямку магнітного поля. При цьому була виконана робота $A = 0,02$ Дж. Знайти магнітну індукцію B поля.

Відповідь: $B = 0,1$ Тл.

1.81 Соленоїд діаметром $d = 4$ см, який має $N = 600$ витків, розміщений у магнітному полі, індукція якого змінюється зі швидкістю $1,2$ мТл/с. Вісь соленоїда складає з вектором магнітної індукції кут $\varphi = 60^\circ$. Визначити ЕРС індукції, що виникає в соленоїді.

Відповідь: $|\varepsilon_{ind}| = 452$ мкВ.

1.82 В однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,4$ Тл, розміщена прямокутна рамка, одна сторона якої є рухомою та має довжину $l = 10$ см. Сторона рухається перпендикулярно лініям магнітної індукції зі швидкістю $v = 20$ м/с. Визначити ЕРС індукції, що виникає у рамці.

Відповідь: $|\varepsilon_{ind}| = 0,8$ В.

1.83 Індукція магнітного поля змінюється за законом $B = B_0 \cos \omega t$, де $B_0 = 0,2$ Тл, $\omega = 1$ рад/с. У цьому полі знаходиться провідне кільце радіусом $R = 20$ см, нормаль до площини якого складає з напрямком поля кут $\alpha = 45^\circ$. Визначити ЕРС індукції, яка виникає у кільці в момент часу $t = 2$ с.

Відповідь: $\varepsilon_{ind} = 16,2$ мВ.

1.84 Квадратна рамка з мідного дроту ($\rho = 17$ нОм·м) діаметром $d = 2$ мм знаходиться у магнітному полі перпендикулярно лініям магнітної індукції. Визначити швидкість зміни магнітного поля, якщо струм у рамці $I = 2$ А, а її сторона $a = 10$ см.

Відповідь: $\frac{dB}{dt} = 0,108$ Тл/с.

1.85 У прямокутній рамці з рухомою стороною довжиною $l = 20$ см, яка переміщується перпендикулярно лініям магнітної індукції $B = 0,2$ Тл, виникає ЕРС індукції $\varepsilon_{ind} = 0,4$ В. Визначити швидкість v , з якою рухається ця сторона.

Відповідь: $v = 10$ м/с.

1.86 Максимальний магнітний потік через прямокутну рамку, яка обертається з частотою $\nu = 10$ с⁻¹ в однорідному магнітному полі, дорівнює 100 мВб. Визначити амплітуду індукованої ЕРС.

Відповідь: $\varepsilon_0 = 6,28$ В.

1.87 Площа поперечного перерізу довгого соленоїда, що має $N = 1000$ витків, дорівнює $S = 20$ см². Обмоткою соленоїда протікає струм силою $I = 5$ А і створює усередині магнітне поле з індукцією $B = 15$ мТл. Визначити індуктивність соленоїда.

Відповідь: $L = 6$ мГн.

1.88 Визначити, у скільки разів більше потрібно намотати витків на одну котушку порівняно з іншою, щоб її індуктивність у 25 разів перебільшувала індуктивність другої котушки за умови, що ці обидві котушки намотані на загальне осердя.

Відповідь: $\frac{N_1}{N_2} = 5$.

1.89 Взаємна індуктивність двох котушок, що намотані на одне загальне осердя, дорівнює $L_{12} = 0,2$ Гн. Визначити ЕРС ε_{12} у другій котушці, якщо швидкість зміни сили струму у першій котушці $\frac{dI}{dt} = 5$ А/с.

Відповідь: $\varepsilon_{12} = 1$ В.

1.90 Визначити максимальну ЕРС індукції, що виникає у рамці площею $S = 40$ см², яка вміщує $N = 1000$ витків, під час її обертання в однорідному магнітному полі $B = 0,2$ Тл з частотою $\nu = 600$ хв⁻¹. Вісь обертання лежить у площині рамки і перпендикулярна лініям індукції.

Відповідь: $|\varepsilon_{ind}| = 50,2$ В.

1.91 На немагнітний стрижень, поперечний переріз якого є квадрат зі стороною $a = 3 \text{ см}$, намотаний в один шар дріт. Загальна кількість витків такого соленоїда $N = 1000$, а довжина $l = 50 \text{ см}$. Сила струму в обмотці $I = 1 \text{ А}$. Визначити енергію W всередині соленоїда.

Відповідь: $W = 1,13 \text{ мДж}$.

1.92 На стрижні із заліза довжиною $l = 25 \text{ см}$ намотано $N = 250$ витків із проводу. По обмотці соленоїда тече струм силою $I = 3 \text{ А}$. Знайти об'ємну густину енергії w магнітного поля в осерді. Скористайтеся графіком $B = f(H)$ (рис. 1.2).

Відповідь: $w = 2,175 \text{ кДж/м}^3$.

1.93 Енергія магнітного поля в соленоїді $W = 1 \text{ Дж}$, сила струму в обмотці $I = 6 \text{ А}$, а кількість витків обмотки $N = 1800$. Визначити магнітний потік Φ крізь поперечний переріз соленоїда.

Відповідь: $\Phi = 185 \text{ мкВб}$.

1.94 Об'ємна густина енергії магнітного поля усередині соленоїда дорівнює $w = 0,15 \text{ Дж/м}^3$. Довжина соленоїда $l = 0,8 \text{ м}$, площа поперечного перерізу $S = 20 \text{ см}^2$, сила струму в обмотці $I = 2 \text{ А}$. Визначити його індуктивність.

Відповідь: $L = 60 \text{ мкГн}$.

1.95 Соленоїд має осердя з немагнітного матеріалу. Довжина соленоїда $l = 60 \text{ см}$, кількість витків $N = 1200$, сила струму в обмотці $I = 1 \text{ А}$. Визначити об'ємну густину магнітного поля усередині соленоїда.

Відповідь: $w = 2,512 \text{ Дж/м}^3$.

1.96 За час $t = 0,002 \text{ с}$ в обмотці електромагніту виділяється кількість теплоти, яка дорівнює енергії магнітного поля в осерді. Визначити індуктивність обмотки, якщо вона має опір $R = 20 \text{ Ом}$ і знаходиться під постійною напругою.

Відповідь: $L = 0,8 \text{ Гн}$.

1.97 Енергія магнітного поля соленоїда $W = 100$ мДж. Магнітний потік крізь його поперечний переріз $\Phi = 0,2$ мВб. Сила струму в обмотці соленоїда $I = 2$ А. Визначити кількість витків соленоїда.

Відповідь: $N = 500$.

1.98 Котушка з малим перерізом і довжиною $l = 40$ см з осердям із сталі має 400 витків. Визначити магнітну проникність μ сталі і об'ємну густину w енергії магнітного поля в осерді, якщо сила струму в обмотці $I = 0,8$ А. Скористайтесь графіком $B = f(H)$ (рис. 1.2).

Відповідь: 1) $\mu = 1045$; 2) $w = 840$ Дж/м³.

1.99 Соленоїд без осердя довжиною $l = 60$ см вміщує $N = 300$ витків. Визначити силу струму I в обмотці, якщо об'ємна густина енергії магнітного поля усередині соленоїда $w = 0,2$ Дж/м³.

Відповідь: $I = 1,13$ А.

1.100 Соленоїд діаметром $D = 5$ см має $N = 1000$ витків. Сила струму в обмотці $I = 4$ А. Магнітна індукція всередині соленоїда $B = 0,02$ Тл. Визначити енергію магнітного поля в соленоїді.

Відповідь: $W = 78,5$ мДж.

1.101 Період коливань контуру, що складається з котушки і конденсатора, які з'єднані паралельно, $T = 33,2$ нс. Повітряний конденсатор являє собою дві круглі пластини на відстані $d = 1$ см діаметром $D = 20$ см. Визначити індуктивність котушки.

Відповідь: $L = 1$ мкГн.

1.102 Контур складається зі з'єднаних паралельно конденсатора ємністю $C = 200$ пФ і котушки довжиною $l = 20$ см, площею $S = 4$ см², з $N = 800$ витків та немагнітним осердям. Визначити, на яку довжину хвилі налаштований контур.

Відповідь: $\lambda = 1,068$ км.

1.103 Коливальний контур складається з котушки індуктивністю $L = 1$ мГн і конденсатора змінної ємності. Діапазон довжин електромагнітних хвиль, які можуть викликати резонанси в контурі, складає від $\lambda_1 = 200$ м до $\lambda_2 = 600$ м. Визначити межі зміни ємності конденсатора. Активним опором знехтувати.

Відповідь: $C_{\min} = 11,3$ пФ, $C_{\max} = 101,4$ пФ.

1.104 Знайти період коливань контуру, який складається з котушки довжиною $l = 50$ см, площею поперечного перерізу $S_L = 2$ см² і тисячею витків та конденсатора з двома пластинами на відстані $d = 2$ мм та площею $S_C = 50$ см² кожна. Простір між пластинами конденсатора заповнений парафіном ($\epsilon = 2$).

Відповідь: $T = 0,93$ мкс.

1.105 У коливальному контурі конденсатор являє собою дві круглі паралельні пластини на відстані $d = 2$ мм радіусом $R_C = 2$ см, з діелектричною проникністю $\epsilon = 100$ середовища між пластинами. Котушка радіусом $R_L = 1$ см і довжиною $l = 8$ см має $N = 800$ витків. Знайти власну частоту коливального контуру і довжину резонансної хвилі.

Відповідь: $\omega_0 = 7,55 \cdot 10^5$ рад/с, $\lambda = 2,5$ км.

1.106 Індуктивність котушки коливального контуру $L = 5$ мГн, ємність конденсатора $C = 0,05$ мкФ, опір $R = 10$ Ом. Визначити кількість повних коливань, через яку амплітуда струму зменшиться в e разів.

Відповідь: $N = 10$.

1.107 Визначити, через скільки повних коливань енергія коливального контуру зменшилась у $n = 16$ разів, якщо логарифмічний декремент $\lambda = 0,138$.

Відповідь: $N = 10$.

1.108 Добротність коливального контуру $Q = 3000$, частота затухаючих коливань $\nu = 600$ кГц. Визначити час, за який амплітуда сили струму в цьому контурі зменшилась у 10 разів.

Відповідь: $t = 3,66$ мс.

1.109 Визначити власну частоту коливального контуру, якщо резонансна частота контуру $\nu = 499,5$ Гц, а логарифмічний декремент згасання $\lambda = 0,2$.

Відповідь: $\nu_0 = 500$ Гц.

1.110 Індуктивність котушки коливального контуру $L = 6$ мГн, а ємність конденсатора $C = 0,3$ мкФ. Знайти логарифмічний декремент і опір контуру, якщо за час $t = 1$ мс напруга на обкладинках конденсатора зменшилася у 4 рази.

Відповідь: $Q = 0,358$, $R = 16,6$ Ом.

1.111 Інтенсивність плоскої електромагнітної хвилі, яка розповсюджується у вакуумі уздовж осі x , дорівнює $I = 1$ Вт/м². Визначити амплітуду напруженості магнітного поля H_m .

Відповідь: $H_m = 7,28 \cdot 10^{-2}$ А/м.

1.112 Амплітуда напруженості магнітного поля плоскої електромагнітної хвилі, яка розповсюджується у вакуумі уздовж осі x , дорівнює $H_m = 0,1$ А/м. Визначити інтенсивність хвилі I .

Відповідь: $I = 1,89$ Вт/м².

1.113 Плоска електромагнітна хвиля розповсюджується у немагнітному середовищі, діелектрична проникність якого $\epsilon = 81$. Амплітуда напруженості магнітного поля дорівнює $H_m = 0,05$ А/м. Визначити амплітуду напруженості електричного поля і швидкість розповсюдження хвилі.

Відповідь: $E_m = 2,09$ В/м, $\nu = 3,3 \cdot 10^7$ м/с.

1.114 Обчисліть імпульс електромагнітної хвилі, якщо напруженість її електричного поля $E = 50$ мкВ/м.

Відповідь: $G = 7,4 \cdot 10^{-29}$ Дж·с/м⁴.

1.115 Кут між напрямком розповсюдження плоскої електромагнітної хвилі і поверхнею, на яку у повітрі падає хвиля, дорівнює $\alpha = 30^\circ$. Амплітуда напруженості її електричного поля $E_m = 0,4$ мВ/м. Тиск, який спричиняє хвиля на поверхню, дорівнює $p = 6 \cdot 10^{-19}$ Н/м². Знайти коефіцієнт відбиття ρ поверхні.

Відповідь: $\rho = 0,7$.

1.116 На перешкоду з коефіцієнтом відбиття $\rho = 0,8$ падає електромагнітна хвиля під кутом $\varphi = 60^\circ$ та спричиняє тиск $p = 9 \cdot 10^{-14} \text{ Н/м}^2$. Визначити амплітуду напруженості магнітного поля.

Відповідь: $H = 0,4 \text{ мА/м}$.

1.117 Імпульс електромагнітної хвилі у повітрі $G = 1,6 \cdot 10^{-28} \text{ Дж} \cdot \text{с/м}^4$. Визначити амплітуди електричного і магнітного полів хвилі.

Відповідь: $E_m = 104 \text{ мкВ/м}$, $H_m = 27,6 \text{ мкА/м}$.

1.118 Обчисліть інтенсивність плоскої електромагнітної хвилі, яка розповсюджується у вакуумі уздовж осі x , якщо амплітуда напруженості електричного поля хвилі $E_m = 10 \text{ мВ/м}$.

Відповідь: $I = 0,134 \text{ мкВт/м}^2$.

1.119 На поверхню, коефіцієнт відбиття якої $\rho = 0,9$, падає плоска електромагнітна хвиля з амплітудою магнітного поля $H_m = 0,2 \text{ мА/м}$ та спричиняє тиск $p = 3,8 \cdot 10^{-14} \text{ Н/м}^2$. Знайти кут падіння хвилі до поверхні.

Відповідь: $\alpha = 63^\circ 40'$.

1.120 Інтенсивність електромагнітної хвилі, яка нормально падає на поглинаючу поверхню, дорівнює $I = 0,30 \text{ Вт/м}^2$. Визначити тиск та імпульс, що спричиняє хвиля на поверхню.

Відповідь: $p = 1 \text{ нН/м}^2$, $G = 3,33 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} \cdot \text{с/м}^4$.

2 ХВИЛЬОВА ОПТИКА

2.1 Мета заняття

Засвоїти основні закони хвильової оптики. Навчитися використовувати на практиці основні співвідношення, що описують такі явища, як інтерференція, дифракція, поляризація, дисперсія та поглинання світла.

2.2 Методичні вказівки з організації самостійної роботи

Для більш повного засвоєння матеріалу потрібно вивчити розділи «Інтерференція світла», «Дифракція світла» [2, розд. 2, 3; 4, розд. 12, 13; 6, розд. 8.3, 8.4], «Поляризація» й «Дисперсія та поглинання світла» [2, розд. 4; 4, розд. 14; 6, розд. 8.5], а також використовувати конспект лекцій.

Під час вивчення розділу «Інтерференція світла» насамперед необхідно навчитися проводити розрахунок інтерференційної картини.

Задачі на інтерференцію можуть бути двох типів:

1. Дослідження інтерференції світла від двох когерентних джерел випромінювання, за якого використовуються дзеркала Френеля, біпризма Френеля, дзеркало Ллойда, дослід Юнга тощо.
2. Дослідження інтерференції в тонких плівках. Інтерференційні полоси рівного нахилу та рівної товщини.

Під час розгляду явища дифракції основною метою є розрахунок дифракційної картини, тобто знаходження розподілу інтенсивності світла залежно від розмірів та форми неоднорідностей, які спричиняють дифракцію.

Необхідно розрізняти два види дифракції: дифракцію Фраунгофера (дифракція паралельних променів) та дифракцію Френеля (дифракція сферичних хвиль).

Під час розгляду явища поляризації необхідно звернути увагу на такі поняття, як неполяризована, часткова чи повністю поляризована світлова хвиля, площина поляризації, поляризатор, аналізатор. Варто також ознайомитися з принципом дії призми Ніколя та згадати закони відбиття та заломлення світла.

Необхідно усвідомити зміст таких явищ як поглинання світла, розсіювання світла та дисперсія світла.

2.3 Основні закони і формули

Інтерференція світла

1. Швидкість світла в середовищі

$$v = c/n,$$

де c – швидкість світла у вакуумі, n – абсолютний показник заломлення середовища.

2. Закон відбиття світла: кут падіння променів дорівнює куту відбиття.

$$\alpha = \alpha'.$$

3. Закон заломлення світла

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

де α і β – кути падіння і заломлення, n_1 і n_2 – абсолютні показники заломлення для першого і другого середовища, n_{21} – відносний показник заломлення другого середовища відносно першого.

4. Оптичний шлях світла у середовищі

$$L = \int n dS,$$

де S – геометричний шлях. Якщо середовище однорідне, тобто $n = \text{const}$

$$L = nS.$$

5. Оптична різниця ходу двох світлових хвиль

$$\Delta = L_2 - L_1 = n_2 S_2 - n_1 S_1,$$

де n_1 і n_2 – показники заломлення, S_1 і S_2 – шляхи відповідних хвиль.

6. Результуюча інтенсивність світла під час накладання двох монохроматичних хвиль однакової частоти

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta,$$

де $\delta = 2\pi\Delta / \lambda_0$ – різниця фаз хвиль, λ_0 – довжина хвилі у вакуумі.

7. Граничний порядок інтерференції, що спостерігається

$$m_{zp} \approx \lambda / \Delta \lambda.$$

8. Умови інтерференційних максимумів

$$\Delta = \pm m\lambda_0, \quad m = 0, 1, 2, \dots,$$

і мінімумів

$$\Delta = \pm (m + 1/2)\lambda_0, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Зв'язок між довжиною $l_{\text{ког}}$, часом $\tau_{\text{ког}}$ і радіусом $\rho_{\text{ког}}$ когерентності

$$l_{\text{ког}} = c\tau_{\text{ког}} \approx \lambda^2 / \Delta\lambda, \quad \rho_{\text{ког}} = \lambda_0 / \psi,$$

де $\lambda / \Delta\lambda$ – ступінь монохроматичності світла, ψ – кутовий розмір джерела.

9. Під час відбиття світла від середовища з оптично більшою густиною фаза хвилі стрибком змінюється на π , а оптичний шлях хвилі відповідно на $\lambda/2$.

10. Різниця ходу світлових хвиль, відбитих від верхньої і нижньої поверхонь плоскопаралельної пластинки або плівки з показником заломлення n

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \frac{\lambda_0}{2} = 2dn \cos \beta - \frac{\lambda_0}{2},$$

де d – товщина пластинки (плівки), α – кут падіння променів на неї, β – кут заломлення. Для світла, що проходить крізь плівку, відбиття світлової хвилі відбувається від середовища з меншою оптичною густиною, тому додаткової різниці ходу світлових променів не спостерігається.

Умова підсилення світла під час відбиття від тонкої плівки у повітрі

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \frac{\lambda_0}{2} = (m + 1/2)\lambda_0,$$

умова послаблення світла

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \frac{\lambda_0}{2} = m\lambda_0.$$

11. Радіуси світлого $\rho_m^{c\phi}$ і темного ρ_m кілець Ньютона з номером m у відбитому світлі

$$\rho_m^{c\phi} = \sqrt{(m - 1/2)R\lambda}, \quad \rho_m = \sqrt{mR\lambda}, \quad m = 1, 2, 3, \dots,$$

де R – радіус кривизни лінзи. У прохідному світлі розміщення світлих і темних кілець обернене їхньому розміщенню у відбитому світлі.

Дифракція світла

12. Кількість відкритих зон Френеля для дифракції Френеля від відкритого отвору радіуса r

$$m = \frac{r^2}{\lambda} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right),$$

де a – відстань від джерела до перепони, b – відстань від перепони до точки спостереження.

13. Зовнішній радіус m -ї зони Френеля для сферичної хвилі

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b} m \lambda}, \quad m = 1, 2, 3, \dots,$$

де a – відстань діафрагми з круглим отвором до точкового джерела світла, b – відстань від діафрагми до екрана, де спостерігається дифракційна картина, m – номер зони Френеля, λ – довжина хвилі.

Для плоскої хвилі

$$r_m = \sqrt{b m \lambda}, \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

14. Під час дифракції Фраунгофера на щілині шириною a за нормального падіння світла:

умова мінімумів інтенсивності світла

$$a \sin \varphi = \pm m \lambda, \quad m = 1, 2, 3, \dots,$$

умова максимумів інтенсивності

$$a \sin \varphi = \pm (m + 1/2) \lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots,$$

де φ – кут дифракції, m – номер максимуму або мінімуму.

15. Під час дифракції світла на дифракційній решітці з періодом $d = a + b$ (a – ширина щілини, b – відстань між щілинами) умова головних максимумів інтенсивності

$$d \sin \varphi = \pm m \lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots,$$

де m – порядок головного максимуму.

16. Роздільна сила дифракційної решітки

$$R = \lambda / \Delta \lambda = m N,$$

де $\Delta \lambda$ – найменша різниця довжин хвиль двох сусідніх спектральних ліній (λ і $\lambda + \Delta \lambda$), які можна розділити за допомогою цієї решітки, m – порядковий номер дифракційного максимуму, N – кількість щілин у решітці.

17. Кутова дисперсія дифракційної решітки

$$D_{\varphi} = \frac{\delta\varphi}{\delta\lambda} = \frac{m}{d \cos \varphi}.$$

18. Лінійна дисперсія дифракційної решітки

$$D_l = \delta l / \delta \lambda,$$

де $\delta\varphi$ – кутова відстань, δl – лінійна відстань між спектральними лініями, які відрізняються за довжиною хвилі на $\delta\lambda$.

19. Формула Вульфа–Брегга

$$2d \sin \theta = \pm m\lambda, \quad m = 1, 2, 3, \dots,$$

де d – відстань між атомними площинами кристала, θ – кут ковзання, який визначає напрямок, у якому спостерігається відбиття рентгенівських променів.

Поляризація світла

20. Закон Брюстера: відбита світлова хвиля повністю поляризована з кутом падіння φ_B , який визначається співвідношенням

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

де $n_{21} = n_2 / n_1$ – відносний показник заломлення двох середовищ.

21. Закон Малюса

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

де I – інтенсивність плоскополяризованого світла на виході з аналізатора, I_0 – інтенсивність плоскополяризованого світла на вході в аналізатор, φ – кут між напрямком коливань світлового вектора хвилі, що падає на аналізатор, та площиною пропускання приладу.

22. Ступінь поляризації плоскополяризованого світла

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

де $I_{\max}$ і $I_{\min}$ – відповідно максимальна й мінімальна інтенсивність частково поляризованого світла, що пройшло через аналізатор.

23. Закон Бугера–Ламберта

$$I = I_0 e^{-kx},$$

де I_0 – значення інтенсивності світла на вході у шар середовища товщиною x , I – значення інтенсивності світла на виході з середовища, k – коефіцієнт поглинання середовища.

2.4 Контрольні запитання та завдання

1. Яке явище має назву інтерференції світла та які умови її спостереження?
2. Які хвилі називаються когерентними?
3. Що таке геометрична та оптична різниця ходу?
4. Запишіть умови мінімуму та максимуму інтенсивності під час інтерференції світла.
5. Назвіть способи одержання когерентних джерел світла.
6. Що таке дифракція світла? Які види дифракції ви знаєте?
7. У чому полягає відмінність дифракції Френеля від дифракції Фраунгофера?
8. Визначте умови спостереження дифракції світла.
9. У чому полягає принцип побудови зон Френеля?
10. Запишіть умови дифракційних мінімумів і максимумів для однієї щілини, для дифракційної решітки.
11. Як визначається розподіл інтенсивності світла у випадку дифракції у паралельних променях на одній щілині та на дифракційній решітці?
12. Який вигляд має дифракційний спектр видимого світла? Чим він відрізняється від призматичного спектра?
13. Що таке лінійна, кутова дисперсія і роздільна сила дифракційної решітки?
14. Запишіть формулу Вульфа–Брегга. Яке її практичне застосування?
15. Яке явище має назву дисперсії світла? Чим відрізняється нормальна дисперсія від аномальної?
16. Яке світло називається природним, а яке – поляризованим та частково поляризованим?
17. Що називається ступенем поляризації світла? Чому дорівнює ступінь поляризації природного, плоскополяризованого світла?
18. Сформулюйте закон Малюса.
19. Під яким кутом світло має падати на межу поділу двох прозорих діелектриків, щоб відбитий промінь був повністю поляризований?
20. Що називається поглинанням світла? Сформулюйте закон Бугера.

21. Який фізичний зміст поняття «коефіцієнт поглинання»? Від чого залежить цей коефіцієнт?

22. Чим відрізняються групова та фазова швидкості хвилі? Якою формулою вони пов'язані?

2.5 Приклади розв'язання задач

Задача 1. Два когерентних джерела світла S' і S'' розташовані на відстані $d = 5 \text{ мм}$ одне від одного і на відстані $L = 6 \text{ м}$ від екрана (рис. 2.1). Довжина хвилі джерел у вакуумі $\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$. Визначити на екрані місце розташування п'ятого максимуму і відстань між сусідніми максимумами.

Розв'язання

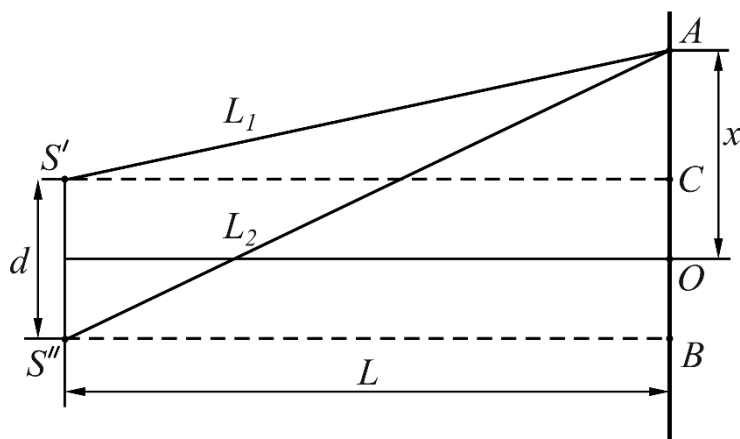


Рисунок 2.1

Хвилі від джерел S' і S'' , які інтерферують у точці A , до зустрічі проходять різні геометричні шляхи L_1 і L_2 . Маючи на увазі, що показник заломлення середовища, де розповсюджуються хвилі, дорівнює одиниці, можна записати оптичну різницю ходу двох променів:

$$\Delta = (L_2 - L_1)n = L_2 - L_1. \quad (1)$$

Умову максимуму інтенсивності отримаємо

$$L_2 - L_1 = m\lambda, \quad (2)$$

Враховуючи це, для визначення положення максимуму потрібно зв'язати різницю ходу з координатою x точки A на екрані.

З $\triangle CS'A$ враховуючи, що $(CO = d/2)$, одержуємо:

$$L_1^2 = L^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2, \quad (3)$$

а з $\Delta BS''A$ одержуємо:

$$L_2^2 = L^2 + (x + d/2)^2. \quad (4)$$

Віднімаючи від (4) співвідношення (3), маємо:

$$(L_2 - L_1)(L_2 + L_1) = 2xd. \quad (5)$$

Враховуючи, що відстань між джерелами набагато менша відстані від джерел випромінювання до екрана, можна вважати $L_1 \approx L_2 \approx L$, тобто $L_2 + L_1 = 2L$, тоді з (5) випливає:

$$L_2 - L_1 = 2xd/2L = xd/L. \quad (6)$$

Використовуючи (2) та (6), визначаємо положення m -го максимуму:

$$x_m = \frac{m\lambda L}{d}.$$

Якщо середовище має показник заломлення n , то:

$$x_m = \pm \frac{m\lambda L}{nd}.$$

Відстань між сусідніми максимумами (а також між сусідніми мінімумами)

$$\Delta x = x_{m+1} - x_m = \frac{L}{d} \lambda,$$

Таким чином, відстань Δx не залежить від порядку інтерференції, тобто інтерференційна картина має вигляд світлих і темних смуг рівної ширини.

Відповідь: $x_5 = 3 \cdot 10^{-3}$ м, $\Delta x = 6 \cdot 10^{-4}$ м.

Задача 2. На тонку плівку з показником заломлення $n_2 = 1,4$ падає біле світло під кутом $\alpha = 55^\circ$. 1) Яку товщину d повинна мати плівка, щоб у відбитому світлі вона здавалася зеленою ($\lambda = 550$ нм)? 2) Як зміниться товщина плівки, якщо спостереження вести у прохідному світлі? Показник заломлення середовища $n_1 = 1$.

Розв'язання

1) Під час відбиття інтерферують промені 1' (відбитий від верхньої поверхні плівки) і 2' (відбитий від нижньої поверхні), які потім падають паралельно на збираючу лінзу L . Відбиття в точці A відбувається від середовища з більшою оптичною густиною, отже фаза відбитого променя змінюється на π , тобто губиться половина довжини хвилі. Отже оптична різниця ходу променів 2' і 1'

$$\Delta = (AB + BC)n_2 - AD \cdot n_1 - \lambda/2. \quad (1)$$

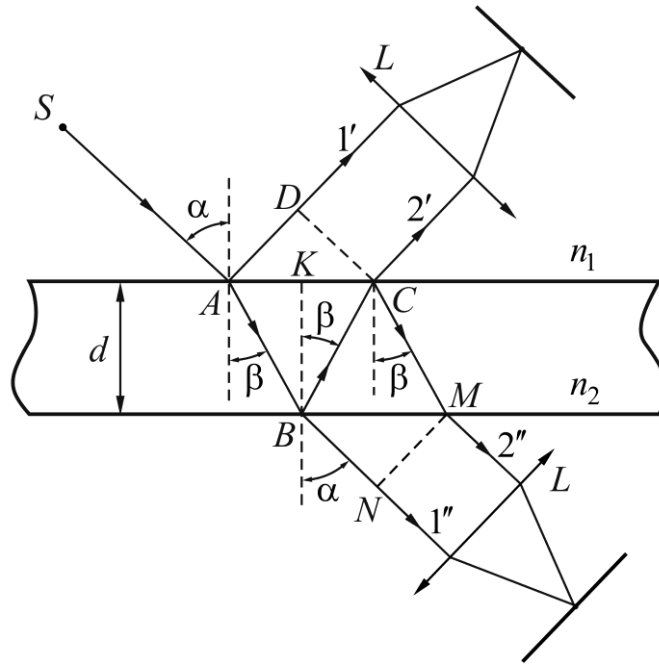


Рисунок 2.2

З рисунка 2.2 одержимо

$$AB = d / \cos \beta, \quad AD = AC \cdot \sin \alpha = 2 \cdot AK \cdot \sin \alpha = 2d \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \sin \alpha, \quad (2)$$

де α – кут падіння променів, β – кут заломлення.

Підставляючи (2) в (1), отримаємо

$$\Delta = \frac{2d \cdot n_2}{\cos \beta} - 2d \cdot n_1 \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \sin \alpha - \frac{\lambda}{2} = \frac{2d \cdot n_2}{\cos \beta} \left(1 - \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha \right) - \frac{\lambda}{2}.$$

Із закону заломлення світла отримаємо, що

$$\sin \alpha = \sin \beta \cdot n_2 / n_1,$$

тоді одержимо

$$\Delta = \frac{2d \cdot n_2}{\cos \beta} (1 - \sin^2 \beta) - \frac{\lambda}{2} = 2d \cdot n_2 \cdot \cos \beta - \frac{\lambda}{2},$$

або

$$\Delta = 2d \cdot n_2 \sqrt{1 - \sin^2 \beta} - \frac{\lambda}{2} = 2d \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \cdot \sin^2 \alpha} - \frac{\lambda}{2}.$$

Умова інтерференційного максимуму

$$\Delta = \pm m \lambda.$$

Звідки

$$2t \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \cdot \sin^2 \alpha} = (m + 1/2) \lambda.$$

Для мінімальної товщини плівки ($m = 0$)

$$d_{\min} = \frac{\lambda}{4 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \cdot \sin^2 \alpha}}.$$

2) Під час спостереження інтерференції у світлі, що проходить крізь плівку, інтерферують промені 1'' і 2'' (рис. 2.2). У цьому випадку оптична різниця ходу

$$\Delta = 2BC \cdot n_2 - BN \cdot n_1,$$

звідки для спостереження інтерференційного максимуму отримаємо

$$2t\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \cdot \sin^2 \alpha} = m\lambda.$$

Для мінімальної товщини плівки ($m = 0$)

$$d'_{\min} = \frac{\lambda}{2\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \cdot \sin^2 \alpha}}.$$

Відповідь: $d_{\min} = 0,121 \text{ мкм}$, $d'_{\min} = 0,242 \text{ мкм}$.

Задача 3. Скільки штрихів на 1 см довжини має дифракційна решітка, якщо зелена лінія ртуті з довжиною хвилі $\lambda = 546,1 \text{ нм}$ у спектрі другого порядку, спостерігається під кутом $\varphi = 32,7^\circ$? Визначити найбільший порядок головного максимуму, який створюється цією решіткою для даної довжини хвилі.

Розв'язання

Згідно з умовою максимумів дифракційної решітки

$$d \sin \varphi = m\lambda.$$

Зважаючи на те, що стала решітки обернено пропорційна з кількістю штрихів, отримаємо

$$N = \frac{\sin \varphi}{m\lambda}.$$

Найбільший порядок максимуму, який можна спостерігати за допомогою цієї решітки, знайдемо за умови: $\varphi_{\max} = 90^\circ$, $\sin \varphi_{\max} = 1$, тоді

$$m_{\max} = \frac{1}{N\lambda}.$$

Відповідь: $N = 4500 \text{ см}^{-1}$, $m_{\max} = 4$.

Задача 4. Жовте світло натрію (якому відповідають довжини хвиль $\lambda_1 = 589 \text{ нм}$ та $\lambda_2 = 589,59 \text{ нм}$) падає на дифракційну решітку, що має 7500 штрихів на сантиметр. Визначити: 1) максимум якого найбільшого порядку спостерігається для жовтого світла натрію; 2) кутову дисперсію дифракційної решітки; 3) роздільну здатність дифракційної решітки, яка необхідна для розділення двох ліній натрію; 4) ширину решітки у цьому випадку.

Розв'язання

1) Згідно з умовою максимумів для дифракційної решітки

$$d \sin \varphi = m\lambda, \quad (1)$$

де d – стала (період) дифракційної решітки, λ – довжина хвилі, m – порядок дифракційного максимуму, φ – кут відхилення променів, які відповідають m -му дифракційному максимуму.

Зважаючи на те, що стала решітки d обернено пропорційна кількості штрихів на одиницю довжини решітки N , то

$$d = 1/N. \quad (2)$$

Найбільший порядок максимуму, який можна спостерігати за допомогою цієї решітки, знайдемо з формул (1) і (2), беручи до уваги, що максимальний кут відхилення променів решіткою не може перевищувати 90° :

$$m \leq \frac{1}{N\lambda} \sin \varphi_{\max},$$

де m – ціле число.

2) Кутова дисперсія дифракційної решітки

$$D_\varphi = \frac{\delta\varphi}{\delta\lambda} = \frac{m}{d \cos \varphi}. \quad (3)$$

Лінія натрію у спектрі другого порядку спостерігається при

$$\sin \varphi = 2\lambda/d, \quad (4)$$

$$\cos \varphi = \sqrt{1 - \sin^2 \varphi}, \quad (5)$$

Враховуючи (2), (3), (4) і (5), отримаємо

$$D_\varphi = \frac{mN}{\sqrt{1 - 4\lambda^2/d^2}}.$$

3) Роздільну здатність знайдемо з умови для розділення двох ліній натрію

$$R = \lambda/\Delta\lambda,$$

4) Ширина решітки визначається за формулою

$$l = N' \cdot d. \quad (6)$$

Повну кількість штрихів N' знайдемо з формули роздільної здатності $R = mN'$

$$N' = R/m. \quad (7)$$

Враховуючи (2), (6), і (7), отримаємо

$$l = R/mN.$$

Відповідь: $m_{\max} = 2$, $D_\varphi = 3,24 \cdot 10^{-3}$ рад/нм, $R = 1000$, $l = 6,7 \cdot 10^{-4}$ м.

Задача 5. Який кут складають між собою головні площини поляризаторів, якщо інтенсивність природного світла, що пройшло крізь два поляризатори, зменшилася у 3,29 разів? Під час проходження кожного з поляризаторів втрати на відбиття і поглинання світла дорівнюють $k = 10\%$.

Розв'язання

Поляризатор пропускає коливання, паралельні головній площині поляризатора, тому інтенсивність природного світла після проходження ідеального поляризатора зменшується вдвічі. З урахуванням втрат на відбиття і поглинання інтенсивність світла, що пройшло крізь перший поляризатор

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

де I_0 – інтенсивність природного світла, що падає на перший поляризатор.

Інтенсивність світла, що пройшло крізь другий поляризатор (аналізатор) з урахуванням втрат, знайдемо за законом Малюса

$$I_2 = I_1 (1 - k) \cos^2 \varphi = \frac{1}{2} I_0 (1 - k)^2 \cos^2 \varphi,$$

звідки отримаємо

$$\varphi = \arccos \left(\frac{1}{1 - k} \sqrt{\frac{2I_2}{I_0}} \right).$$

Відповідь: $\varphi = 30^\circ$.

Задача 6. Під яким кутом має падати пучок світла з повітря на поверхню води ($n = 1,33$), щоб під час відбиття від дна скляної посудини ($n = 1,5$) світло було повністю поляризоване?

Розв'язання

На межі повітря–вода природне світло (промінь 1) частково відбивається (промінь 2), частково заломлюється (промінь 3). Заломлений промінь 3 частково поляризований. Він частково відбивається від межі вода–скло (промінь 4). (рис. 2.3)

Для того, щоб відбитий промінь 4 був повністю поляризований, має виконуватися умова:

$$\operatorname{tg} \beta = n_{21} = n_2 / n_1,$$

звідки

$$\beta = \operatorname{arctg} (n_2 / n_1). \quad (1)$$

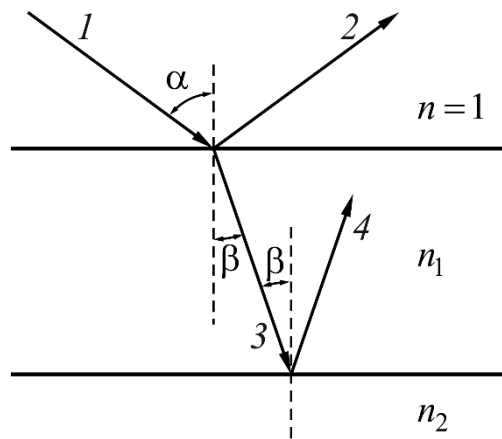


Рисунок 2.3

Щоб знайти кут падіння α , скористаємося законом заломлення світла:

$$\sin \alpha = \frac{n_1}{n} \sin \beta, \quad (2)$$

де $n = 1$ – показник заломлення повітря.

Комбінуючи (1) і (2), отримаємо:

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

Відповідь: $\alpha = 84^\circ$

2.6 Задачі для самостійного розв’язання

2.1 У досліді Юнга знайти відстань між центральною смугою і четвертим інтерференційним максимумом, якщо відстань між щілинами $d = 0,5$ мм, екран розміщений на відстані $L = 3$ м від щілин, а довжина хвилі $\lambda_0 = 0,58$ мкм.

Відповідь: $x = 14$ мм.

2.2 Знайти відстань між щілинами d у досліді Юнга, якщо відстань між третім і п’ятим інтерференційними мінімумами дорівнює $l = 0,8$ см, довжина хвилі $\lambda = 0,48$ мкм, екран розміщений на відстані $L = 5$ м від щілин.

Відповідь: $d = 0,6$ мм.

2.3 Яка найменша товщина мильної плівки ($n = 1,33$), якщо під час спостереження у відбитому світлі вона задається блакитною ($\lambda = 480$ нм). Світло падає на плівку під кутом $\alpha = 30^\circ$ до нормалі.

Відповідь: $d_{\min} = 0,1$ мкм.

2.4 Яку товщину має тонка плівка t з MgF_2 ($n_1 = 1,38$), призначена для гасіння світла з $\lambda = 550$ нм за нормального падіння на скло ($n_2 = 1,5$)?

Відповідь: $d = 99,6$ нм.

2.5 Знайти мінімальну товщину оптичного покриття з показником заломлення $n = 1,47$, для якого відбите світло з довжиною хвилі $\lambda_1 = 0,589$ мкм має максимальну інтенсивність, а з $\lambda_2 = 0,368$ мкм повністю гаситься. Кут падіння світла дорівнює 40° .

Відповідь: $d_{\min} \approx 0,56$ мкм.

2.6 Під час спостереження кілець Ньютона у жовтому світлі $\lambda = 0,58$ мкм, що проходить крізь установку, простір між лінзою і скляною пластиною заповнений водою ($n = 1,33$). Різниця радіусів шістнадцятого і четвертого кілець Ньютона $r_{16} - r_4 = 1,32 \cdot 10^{-3}$ м. Визначити радіус кривизни лінзи R .

Відповідь: $R = 1$ м.

2.7 У світлі з довжиною хвилі $\lambda = 600$ нм, що проходить крізь дві плоскоопуклі лінзи, притиснуті одна до одної опуклими поверхнями, спостерігаються кільця Ньютона. Знайти радіус п'ятого світлого кільця, якщо радіуси кривизни опуклих поверхонь лінз дорівнюють відповідно $R_1 = 1,5$ м, $R_2 = 2$ м.

Відповідь: $r_5 = 1,6 \cdot 10^{-3}$ м.

2.8 В інтерференційному рефрактометрі (застосовується для вимірювання показників заломлення прозорих речовин) дві скляні циліндричні посудини, довжиною $l = 6$ см кожна, заповнені повітрям ($n_0 = 1,00028$). Якщо замінити на аміак повітря в одній з посудин, то інтерференційна картина на екрані зміститься на 10 смуг. Визначити показник заломлення аміаку. Довжина хвилі світла $\lambda = 0,6$ мкм.

Відповідь: $n = 1,00038$.

2.9 На кварцовий клин ($n = 1,54$) нормально падає монохроматичне світло. Визначити довжину світлової хвилі, якщо відстань між двома сусідніми інтерференційними максимумами у відбитому світлі дорівнює 4 мм. Кут між поверхнями клина дорівнює 8 секунд.

Відповідь: $\lambda = 480$ нм.

2.10 На тонкий скляний клин ($n=1,5$) у напрямку нормалі до його поверхні падає монохроматичне світло з довжиною хвилі $\lambda = 600$ нм. Визначити кут α між поверхнями клина, якщо відстань між суміжними інтерференційними максимумами у відбитому світлі дорівнює 4 мм.

Відповідь: $\alpha = 10,3''$.

2.11 На дифракційну решітку падає нормально світло від заповненої гелієм газорозрядної трубки. Визначити довжину хвилі лінії в спектрі третього порядку ($m=3$), яка збігається з червоною лінією ($\lambda_1 = 0,67$ мкм) спектра з $m=2$.

Відповідь: $\lambda_2 = 0,446$ мкм.

2.12 На якій відстані перед діафрагмою з круглим отвором, діаметром $d = 2$ мм, розташоване точкове джерело світла ($\lambda = 500$ нм), якщо відстань від діафрагми до точки спостереження $b = 2$ м, а отвір відкриває три зони Френеля?

Відповідь: $a = 1$ м.

2.13 Біле світло падає нормально на дифракційну решітку, яка має $N = 500$ штрихів на 1 мм. Спектр проєктується на екран лінзою, що розташована поблизу решітки. Відстань від лінзи до екрана $L = 3$ м. Визначити ширину b спектра першого порядку на екрані. Границя видимості спектра $\lambda_{\text{черв}} = 780$ нм, $\lambda_{\text{фіол}} = 400$ нм.

Відповідь: $b = 66$ см.

2.14 Скільки штрихів на 1 см повинна мати дифракційна решітка, щоб куту спостереження $\varphi = 62^\circ$ відповідав максимум четвертого порядку для світла з довжиною хвилі $\lambda = 550$ нм?

Відповідь: $N = 4000 \text{ см}^{-1}$.

2.15 Дві дифракційні решітки мають однакову ширину $l = 3$ см, але різні періоди $d_1 = 3$ мкм, $d_2 = 6$ мкм. Визначити їх найбільші роздільні здатності для жовтої лінії натрію з $\lambda = 589,6$ нм.

Відповідь: $R_1 = 5000$, $R_2 = 5000$.

2.16 Точкове джерело світла знаходиться на відстані $a = 1$ м від круглого отвору, відстань від отвору до екрану $b = 1$ м. Знайти довжину хвилі, для якої радіус п'ятої зони Френеля дорівнює $r_5 = 1,12$ мм.

Відповідь: $\lambda = 500$ нм.

2.17 На щілину шириною $a = 5 \cdot 10^{-5}$ м падає нормально монохроматичне світло з довжиною хвилі $\lambda = 0,45$ мкм. Дифракційна картина спостерігається на екрані, розташованому паралельно щілині. Визначити відстань L від щілини до екрана, якщо ширина центрального дифракційного максимуму дорівнює 2 см.

Відповідь: $L = 1,1$ м.

2.18 Чому дорівнює радіус шостої зони Френеля плоского хвильового фронту, якщо радіус четвертої зони дорівнює 3 мм?

Відповідь: $r_6 = 3,69$ мкм.

2.19 Між точковим джерелом світла та екраном розташували діафрагму з круглим отвором змінного радіусу R . Відстань від діафрагми до джерела $a = 100$ см і від діафрагми до екрана $b = 125$ см. У центрі дифракційної картини спостерігається максимум інтенсивності при $R_1 = 1$ мм, наступний максимум спостерігається при $R_2 = 1,29$ мм. Яку довжину хвилі має світло?

Відповідь: $\lambda = 0,6$ мкм.

2.20 Монохроматичне світло падає на щілину шириною $a = 28,5$ мкм і після її проходження дифракційна картина фокусується лінзою на екран, розташований на відстані $l = 10$ см від неї. Довжина світлової хвилі $\lambda = 0,65$ мкм. Визначити середню відстань Δx між дифракційними смугами.

Відповідь: $\Delta x = 0,23$ см.

2.21 Визначте довжину хвилі рентгенівського випромінювання, що падає на поверхню кристала, якщо під кутом 30° до площини кристала спостерігається дифракційний максимум першого порядку. Відстань між атомними площинами кристала $d = 3$ нм.

Відповідь: $\lambda = 300$ пм.

2.22 Під час проходження в речовині відстані $x_1 = 1,5$ см інтенсивність світла зменшилася в 3 рази. Чому дорівнюватиме шлях x_2 , на якому інтенсивність світла зменшиться в 9 разів?

Відповідь: $x_2 = 3$ см.

2.23 Визначити коефіцієнт поглинання деякої прозорої речовини k , якщо відомо, що інтенсивність світла під час проходження крізь цю речовину товщиною $d = 4$ см зменшується на 12%.

Відповідь: $k = 3,2 \text{ м}^{-1}$.

2.24 Визначити, у скільки разів зменшиться інтенсивність світла, що пройшло крізь дві призми Ніколя, розташованих так, що кут між їх головними площинами дорівнює 45° . Врахуйте у розрахунках, що у кожній призмі втрачається 5% інтенсивності падаючого світла.

Відповідь: $I_0/I_2 = 4,43$.

2.25 Ступінь поляризації частково поляризованого світла $P = 0,2$. Знайти відношення інтенсивності поляризованої складової цього світла до інтенсивності природної складової I_n/I_{np} .

Відповідь: $I_n/I_{np} = 0,25$.

2.26 Визначити ступінь поляризації P світла, утвореного сумішшю природного світла з плоскополяризованим, якщо інтенсивність поляризованого світла втричі більша за інтенсивність природного.

Відповідь: $P = 0,75$.

2.27 Кут між головними площинами аналізатора і поляризатора дорівнює 60° . У скільки разів збільшиться інтенсивність світла, що виходить з аналізатора, якщо кут зменшити до 45° ?

Відповідь: $I_2/I_1 = 2$.

2.28 У скільки разів послаблюється природне світло, що проходить крізь два поляризатори, кут між головними площинами яких дорівнює 45° , якщо в кожному з поляризаторів втрачається 8% світлового потоку, що падає на нього?

Відповідь: $I_0/I_2 = 4,73$.

2.29 Природне світло падає на систему з трьох послідовно розташованих однакових поляроїдів. Головний напрямок середнього поляроїда складає кут $\alpha = 60^\circ$ з головними напрямками двох інших поляроїдів. Кожен поляроїд поглинає лінійно поляризоване світло, а максимальний коефіцієнт пропускання при цьому дорівнює $\tau = 0,81$. У скільки разів зменшиться інтенсивність світла після проходження цієї системи?

Відповідь: $I_0/I = 60$.

2.30 Промінь світла проходить крізь рідину, яка налита у скляну посудину ($n = 1,5$) і відбивається від дна. Відбитий промінь повністю поляризований під час його падіння на дно посудини під кутом $42^\circ 37'$. Знайти: 1) показник заломлення рідини; 2) під яким кутом має падати на дно посудини промінь світла, щоб спостерігалось явище повного внутрішнього відбиття.

Відповідь: 1) $n_p = 1,63$; 2) $\alpha = 66^\circ 56'$.

3 КВАНТОВА ОПТИКА І АТОМНА ФІЗИКА

3.1 Мета заняття

Засвоїти основні підходи та методи розв'язування задач квантової оптики і атомної фізики, а саме:

1. Вивчити закони теплового випромінювання.
2. Ознайомитися з явищами, які свідчать про квантові властивості випромінювання: зовнішнім фотоефектом, тиском світла та ефектом Комптона. Навчитися користуватися рівнянням Ейнштейна, розраховувати енергію, масу, імпульс фотона, тиск світла, зміну довжини хвилі фотона під час його розсіювання на електроні.
3. Засвоїти теорію Бора атома водню. Навчитися застосовувати на практиці постулати Бора та формулу Бальмера для розрахунку спектра водню.
4. Ознайомитися з гіпотезою де Бройля про універсальність корпускулярно-хвильового дуалізму. З'ясувати фізичний зміст співвідношення невизначеності.
5. Ознайомитися з рівнянням Шредінгера, усвідомити фізичний зміст хвильової функції.

3.2 Методичні вказівки з організації самостійної роботи

Під час підготовки до заняття необхідно вивчити теоретичний матеріал, наведений у конспекті лекцій та підручнику, відповісти на контрольні запитання, ретельно розібрати розв'язування задач, що наведені у прикладах.

Для досягнення першої частини мети заняття перед вирішенням задач необхідно опанувати теоретичний матеріал, викладений у [2, розд. 5; 5, §1–7; 6, розд. 9.1]. Засвоїти зміст фізичних величин, що характеризують теплове випромінювання, і законів теплового випромінювання (закон Кірхгофа, закон Стефана–Больцмана, закони Віна, закон Релея–Джинса, формула Планка).

Для досягнення другої частини мети заняття перед вирішенням задач необхідно опанувати теоретичний матеріал, викладений у [2, розд. 5; 5, §8–11; 6, розд. 9]. Ознайомитися з явищами, які свідчать про квантову природу випромінювання. Вивчити закони фотоефекту, рівняння Ейнштейна, формулу Комптона, співвідношення, що визначають енергію, масу, імпульс фотона, тиск світла.

Для досягнення третьої частини мети заняття перед вирішенням задач необхідно опанувати теоретичний матеріал, викладений у [3, розд. 7, 9; 5, §12–17; 6, розд. 10]. Звернути увагу на постулати Бора, квантування електронних орбіт та енергії атому водню, формулу Бальмера.

Для досягнення четвертої частини мети заняття перед вирішенням задач необхідно опанувати теоретичний матеріал, викладений у [3, розд. 6; 6, §18–20; 6, розд. 11.1–11.3]. З'ясувати, що, за де Бройлем, між корпускулярними і хвильовими характеристиками електрона або іншої мікрочастинки існує такий зв'язок, як і між характеристиками фотона. Засвоїти співвідношення невизначеностей Гейзенберга для координат та імпульсу, для енергії та часу.

Для досягнення п'ятої частини мети заняття перед вирішенням задач необхідно опанувати теоретичний матеріал, викладений у [3, розд. 6; 5, §21–27; 6, розд. 11.4–11.11]. З'ясувати, що у квантовій механіці стан мікрочастинки описується хвильовою функцією, фізичний зміст якої пов'язаний з імовірністю виявлення мікрочастинки, яку вона описує, у певному місці простору і у певний момент. Звернути увагу на те, що ψ -функція може бути знайдена під час розв'язання рівняння Шредінгера.

3.3 Основні закони і формули

1. Потік (потужність) випромінювання

$$\Phi = dW/dt,$$

де W – енергія випромінювання, t – час.

2. Енергетична світність тіла (інтегральна випромінювальна здатність)

$$R = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{dW}{dt \cdot dS},$$

де S – площа тіла.

3. Спектральна випромінювальна здатність (спектральна густина енергетичної світності) тіла

$$r_{\omega,T} = dR/d\omega,$$

де ω – циклічна частота.

4. Зв'язок між довжиною хвилі і частотою теплового випромінювання

$$\lambda = \frac{2\pi c}{\omega},$$

де λ – довжина хвилі, c – швидкість світла.

5. Зв'язок між випромінювальною здатністю в частотному діапазоні $r_{\omega,T}$ і діапазоні довжин хвиль $r_{\lambda,T}$

$$r_{\omega,T} = r_{\lambda,T} \frac{2\pi c}{\omega^2} = r_{\lambda,T} \frac{\lambda^2}{2\pi c}.$$

6. Поглинальна здатність тіла

$$\alpha_{\omega,T} = d\Phi'/d\Phi,$$

де $d\Phi$ – потік променевої енергії, що падає на елементарну площадку поверхні, $d\Phi'$ – потік, який поглинається тілом.

7. Закон Кірхгофа

$$r_{\omega,T}/\alpha_{\omega,T} = f(\omega,T) = r_e(\omega,T),$$

$$r_{\nu,T}/\alpha_{\nu,T} = f(\nu,T) = r_e(\nu,T),$$

$$r_{\lambda,T}/\alpha_{\lambda,T} = f(\lambda,T) = r_e(\lambda,T),$$

де $f(\omega,T)$, $f(\nu,T)$, $f(\lambda,T)$ – універсальна функція Кірхгофа – спектральна випромінювальна здатність абсолютного чорного тіла.

8. Закон Стефана–Больцмана

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

де R_e – енергетична світність абсолютно чорного тіла, T – термодинамічна температура, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – стала Стефана–Больцмана.

9. Енергетична світність сірого тіла

$$R = \alpha_T \cdot \sigma T^4.$$

10. Закон зміщення Віна

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

де $\lambda_{\max}$ – довжина хвилі, на яку припадає максимум випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла, $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – стала Віна.

11. Залежність максимальної випромінювальної здатності від температури

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

де константа $C = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)$.

12. Формула Планка

$$r_e(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1},$$
$$r_e(\nu, T) = \frac{2\pi \nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1},$$

де $r_e(\lambda, T)$ і $r_e(\nu, T)$ – випромінювальні здатності абсолютно чорного тіла, λ – довжина хвилі, $\nu = \omega / 2\pi$ – лінійна частота, c – швидкість світла у вакуумі, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана, T – термодинамічна температура, $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка.

13. Енергія кванта

$$\varepsilon = h\nu = hc/\lambda = \hbar\omega,$$

де $\hbar = h/2\pi$, $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

14. Формула Ейнштейна для фотоефекту

$$\varepsilon = A + T_{\max},$$

де $\varepsilon = h\nu = \hbar\omega$ – енергія фотона, який падає на поверхню металу, A – робота виходу електрона з металу, T – максимальна кінетична енергія фотоелектрона.

15. Максимальна кінетична енергія фотоелектрона

а) нерелятивістський фотон ($h\nu = \hbar\omega < 5$ еВ).

$$T_{\max} = \frac{1}{2} m_0 v_{\max}^2,$$

де m_0 – маса спокою електрона;

б) релятивістський фотон ($h\nu = \hbar\omega \gg 5$ кеВ)

$$T_{\max} = (m - m_0)c^2,$$

або

$$T_{\max} = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v_{\max}^2/c^2}} - 1 \right),$$

де m – маса релятивістського електрона.

16. Червона межа фотоефекту

$$\lambda_0 = \frac{hc}{A} = \frac{2\pi\hbar c}{A},$$
$$\nu_0 = A/h, \quad \omega_0 = A/\hbar,$$

де λ_0 – максимальна довжина хвилі, ν_0 і ω_0 – мінімальні частота і циклічна частота випромінювання, за яких ще можливий фотоефект.

17. Тиск світла за нормального падіння на поверхню

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

де $E_e = Nh\nu$ – енергія усіх фотонів, які падають на 1 м^2 в 1 с , тобто енергетична освітленість поверхні, N – кількість фотонів, $w = E_e/c$ – об'ємна густина енергії випромінювання.

18. Маса та імпульс фотона

$$m = \varepsilon/c^2 = h/c\lambda,$$
$$p = mc = h/\lambda = h\nu/c,$$

де $\varepsilon = h\nu$ – енергія фотона.

19. Формула Комптона

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\theta) = \frac{2h}{m_0c}\sin^2\frac{\theta}{2},$$

де λ – довжина хвилі фотона, що падає на вільний або слабко зв'язаний електрон, λ' – довжина хвилі фотона, який розсіявся на кут θ після зіткнення з електроном, m_0 – маса спокою електрона.

20. Комптонівська довжина хвилі

$$\lambda_c = h/m_0c.$$

(Під час розсіяння фотона на електроні $\lambda_c = 2,43\text{ пм}$).

21. Момент імпульсу електрона на стаціонарних орбітах атома водню за теорією Бора

$$m_e v_n r_n = n\hbar, \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

де m_e – маса електрона, r_n – радіус орбіти, v_n – швидкість електрона на орбіті, n – головне квантове число, $\hbar$ – стала Планка.

22. Радіус n -ї стаціонарної орбіти

$$r_n = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar n^2}{ze^2 m_e} = a_0 n^2,$$

де $a_0 = 5,3 \cdot 10^{-11}$ м – перший борівський радіус, z – порядковий номер атома в таблиці Менделєєва.

23. Енергія електрона в атомі водню

$$E_n = -\frac{m_e z^2 e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2} = \frac{E_i}{n^2},$$

де $|E_i| = 2,18 \cdot 10^{-18}$ Дж (13,6 еВ) – енергія іонізації атома водню.

24. Енергія фотона, що випромінюється атомом водню під час переходу з одного стаціонарного стану в інший

$$\varepsilon = h\nu = E_n - E_m = E_i \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

де E_n і E_m – відповідно енергії стаціонарних станів атома до і після випромінювання (поглинання), m і n – квантові числа, які відповідають енергетичним рівням, між якими здійснюється перехід електрона в атомі.

25. Узагальнена формула Бальмера

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

де ν – частота спектральних ліній у спектрі атома водню,

$R = \frac{m_e z^2 e^4}{64\pi^3 \epsilon_0^2 \hbar^3} = 3,29 \cdot 10^{15}$ Гц – стала Рідберга, m – визначає серію ($m=1, 2, 3, \dots$),

n – визначає окремі лінії відповідної серії ($n=m+1, m+2, m+3, \dots$),

$R' = R/c = 1,1 \cdot 10^7$ м⁻¹ – теж стала Рідберга, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла.

26. Короткохвильова межа $\lambda_{\min}$ суцільного рентгенівського спектра

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

де e – заряд електрона, U – різниця потенціалів, яка прикладена до рентгенівської трубки, h – стала Планка, c – швидкість світла.

27. Закон Мозлі у загальному випадку

$$\omega = CR^*(Z - \sigma)^2,$$

де ω – частота ліній рентгенівського спектра, Z – атомний номер елемента, який випромінює цей спектр, $R^* = 2\pi R = 2.07 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$ – стала Рідберга, σ – стала екранування, C – стала.

28. Закон Мозлі для K_α ліній ($\sigma = 1, C = 3/4$):

$$\omega_{K_\alpha} = \frac{3}{4}(Z-1)^2 R^*,$$

або

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

де R' – штрихована стала Рідберга ($R' = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$).

29. Енергія фотона K_α -лінії рентгенівського випромінювання

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

де E_i – енергія іонізації атома водню.

30. Формула де Бройля

$$\lambda = h/p,$$

а) у класичному наближенні ($v \ll c$)

$$p = m_0 v,$$

де m_0 – маса спокою електрона;

б) у релятивістському випадку

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

31. Зв'язок довжини хвилі де Бройля з кінетичною енергією T частинки

а) у класичному наближенні

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0 T}}.$$

б) у релятивістському випадку

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{T(T + 2E_0)}},$$

де $E_0 = m_0 c^2$ – енергія спокою частинки.

32. Співвідношення невизначеностей:

а) для координати та імпульсу частинки

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

де Δp_x – невизначеність проєкції імпульсу частинки на вісь x , Δx – невизначеність її координати;

б) для енергії та часу

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar,$$

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

33. Одновимірне рівняння Шредінгера для стаціонарних станів

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

де $\psi(x)$ – хвильова функція, яка описує стан частинки, E – повна енергія, $U = U(x)$ – потенціальна енергія частинки, m – маса частинки.

34. Густина імовірності

$$\frac{dW(x)}{dx} = |\Psi(x)|^2,$$

де $dW(x)$ – імовірність того, що частинка може бути виявлена на dx ділянці в околиці точки з координатою x .

35. Імовірність знаходження частинки в об'ємі V .

$$W = \int_V dW = \int_V |\Psi|^2 dV.$$

36. Умова нормування хвильової функції

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi|^2 dV = 1.$$

37. Середні значення фізичних величин

$$\langle r \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} r \cdot |\Psi|^2 dV.$$

38. Власна хвильова функція для частинки в нескінченно глибокій потенціальній ямі шириною l

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

39. Коефіцієнт проходження частинки через потенціальний бар'єр довільної форми висотою U ($E < U$).

$$D = D_0 \exp \left[-\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m(U - E)} dx \right],$$

$D_0 \approx 1$ – стала величина.

3.4 Контрольні запитання та завдання

1. Що називають тепловим випромінюванням?
2. Яке тіло називають абсолютно чорним, сірим?
3. Яке випромінювання називається рівноважним?
4. Сформулюйте закони теплового випромінювання.
5. Поясніть фізичний зміст універсальної функції Кірхгофа.
6. Що таке квант? Чому дорівнює енергія кванта?
7. Запишіть формулу Планка для теплового випромінювання.
8. Що називають явищем зовнішнього фотоефекту?
9. Поясніть рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту.
10. Що таке «червона» межа фотоефекту? Від чого вона залежить?
11. Що таке робота виходу фотоелектрона?
12. Чому дорівнює енергія, маса, імпульс фотона?
13. Від чого залежить тиск світла?
14. У чому полягає ефект Комптона?
15. Від чого залежить комптонівське збільшення довжини хвилі?
16. Сформулюйте постулати Бора.
17. Покажіть різницю між моделями атома Резерфорда та Бора.
18. Запишіть вираз для радіусів борівських орбіт атома водню.
19. Запишіть вираз для енергії електронів в атомі водню.

20. Чому спектр атомарних газів лінійчатий?
21. Поясніть узагальнену формулу Бальмера.
22. У чому полягають недоліки теорії Бора?
23. Що таке корпускулярно-хвильовий дуалізм?
24. У чому зміст гіпотези де Бройля?
25. Що таке хвиля де Бройля? Чому дорівнює її довжина?
26. У чому полягають хвильові властивості мікрочастинок?
27. Як визначається групова та фазова швидкість хвиль де Бройля?
28. Запишіть співвідношення невизначеностей, у чому їх зміст?
29. Запишіть рівняння Шредінгера у загальному вигляді, стаціонарне рівняння Шредінгера. Дайте визначення основних параметрів.
30. У чому полягає фізичний зміст Ψ -функції?
31. Від чого залежить ймовірність виявлення частинки у точці простору?
32. Запишіть вираз для Ψ -функції у загальному вигляді.
33. У чому полягає явище тунельного ефекту?

3.5 Приклади розв'язання задач

Задача 1. Температура поверхні однієї зірки дорівнює $T_1 = 10000 \text{ К}$. Знайти температуру поверхні другої зірки, якщо довжина хвилі, яка відповідає максимуму її випромінювальної здатності, на $\Delta\lambda = 0,5 \text{ мкм}$ більше довжини хвилі, що відповідає максимуму випромінювальної здатності першої зірки.

Розв'язання

Для знаходження температури поверхні другої зірки скористаємося законом зміщення Віна. Запишемо його для обох цих зірок.

$$\lambda_{m_1} T_1 = b, \quad (1)$$

$$\lambda_{m_2} T_2 = b. \quad (2)$$

Відповідно до умови

$$\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda. \quad (3)$$

Тоді з рівнянь (1) і (2) з урахуванням (3) маємо

$$T_2 = T_1 \frac{\lambda_{m_1}}{\lambda_{m_2}} = T_1 \frac{\lambda_{m_1}}{\lambda_{m_1} + \Delta\lambda} = \frac{b}{\frac{b}{T_1} + \Delta\lambda}.$$

Відповідь: $T_2 = 3670 \text{ К}$.

Задача 2. На поверхню натрію падає монохроматичне світло ($\lambda = 300$ нм), а потім γ -випромінювання ($\lambda = 1$ пм). Визначити максимальну швидкість фотоелектронів, вибитих з поверхні, для обох цих випадків.

Розв'язання

Для визначення максимальної швидкості фотоелектронів скористаємось рівнянням Ейнштейна для фотоефекту

$$\varepsilon = A + T_{\max} . \quad (1)$$

Енергію фотона знаходимо за формулою.

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda} . \quad (2)$$

Робота виходу для натрію $A = 2,5$ еВ $= 4 \cdot 10^{-19}$ Дж. Кінетичну енергію фотоелектронів у формулі (1) залежно від того, яка швидкість йому надається, знаходимо або за класичною формулою, якщо енергія фотона набагато менша енергії спокою електрона ($\varepsilon \ll E_0 = 0,511$ МеВ), або за релятивістською формулою при енергії фотона, порівняній з енергією спокою електрона.

1) Обчислимо енергію фотона для монохроматичного світла ($\lambda = 300$ нм).
Із формули (2) визначимо енергію падаючого фотона:

$$\varepsilon_1 = 6,63 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 4,15 \text{ еВ}.$$

Енергія фотона виявилася набагато меншою енергії спокою електрона. Таким чином, максимальну кінетичну енергію фотоелектрона знаходимо за класичною формулою

$$T_{\max} = \frac{1}{2} m_0 v_{\max}^2 . \quad (3)$$

Підставляючи (3) в (1), маємо

$$\varepsilon_1 = A + \frac{1}{2} m_0 v_{\max}^2 ,$$

звідки

$$v_{\max} = \sqrt{2(\varepsilon_1 - A)/m_0} . \quad (4)$$

Підставляючи величини в формулу (4), знаходимо що $v_{\max} = 0,76$ Мм/с.

2) Розглянемо тепер випадок, коли на поверхню натрію падає γ -випромінювання з довжиною хвилі $\lambda_2 = 1$ пм.

Обчислимо енергію фотона γ -випромінювання

$$\varepsilon_2 = 19,89 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} = 1,24 \text{ МеВ}.$$

Таким чином, енергія фотона перебільшує енергію спокою електрона більш ніж вдвічі. Тому для визначення кінетичної енергії фотоелектрона скористаємося релятивістським виразом

$$T = E_0 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - (v_{\max}/c)^2}} - 1 \right),$$

звідки виразимо $v_{\max}$

$$v_{\max} = c \frac{\sqrt{T(T + 2E_0)}}{(T + E_0)}.$$

Оскільки робота виходу електронів з натрію дуже мала порівняно з енергією γ -фотона, то у формулі (1) нею можна знехтувати і вважати, що максимальна кінетична енергія електрона дорівнює енергії фотона ε_2 .

Відповідь: 1) $v_{\max} = 0,76 \text{ Мм/с}$; 2) $v_{\max} = 285 \text{ Мм/с}$.

Задача 3. Фотон з енергією $\varepsilon = 0,4 \text{ МеВ}$ розсіявся на вільному електроні. Енергія розсіяного фотона дорівнює $\varepsilon' = 0,2 \text{ МеВ}$. Визначити кут розсіювання.

Розв'язання

Для визначення кута розсіювання фотона скористаємось формулою Комптона у вигляді

$$\lambda' - \lambda = \frac{2h}{m_0 c} \cdot \sin^2 \frac{\theta}{2}. \quad (1)$$

Виразимо довжини хвиль λ' і λ через енергії відповідних фотонів, скориставшись співвідношенням

$$\varepsilon = hc/\lambda. \quad (2)$$

Тоді з формули (2) маємо

$$\lambda = hc/\varepsilon. \quad (3)$$

Підставивши (3) в (1), отримаємо

$$\frac{hc}{\varepsilon'} - \frac{hc}{\varepsilon} = \frac{2h \sin^2 \frac{\theta}{2}}{m_0 c}. \quad (4)$$

Поділимо обидві частини формули (4) на hc . Враховуючи, що $m_0 c^2 = E_0$, вираз (4) набуває вигляду

$$\frac{1}{\varepsilon'} - \frac{1}{\varepsilon} = \frac{2 \sin^2 \frac{\theta}{2}}{E_0},$$

звідси

$$\sin \frac{\theta}{2} = \sqrt{E_0 \left(\frac{1}{\varepsilon'} - \frac{1}{\varepsilon} \right) / 2}.$$

Отже

$$\theta = 2 \arcsin \left(\sqrt{E_0 \left(\frac{1}{\varepsilon'} - \frac{1}{\varepsilon} \right) / 2} \right).$$

Відповідь: $\theta = 105^\circ 20'$.

Задача 4. Пучок монохроматичного світла падає нормально на плоску поверхню. Потік енергії $\Phi = 0,5$ Вт. Сила тиску на поверхню дорівнює $F = 3$ нН. Визначити коефіцієнт відбиття.

Розв'язання

Сила світлового тиску на поверхню дорівнює

$$F = pS, \quad (1)$$

де p – тиск світла, S – площа поверхні.

Тиск світла знаходимо за формулою

$$p = \frac{E_e(\rho + 1)}{c}, \quad (2)$$

де E_e – опроміненість поверхні, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла.

Підставляючи (2) в (1), отримаємо

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

але $E_e S = \Phi$, тоді

$$F = \frac{\Phi(\rho + 1)}{c},$$

звідки

$$\rho = \frac{cF}{\Phi} - 1.$$

Відповідь: $\rho = 0,8$.

Задача 5. Обчислити радіус п'ятої орбіти в атомі водню і визначити швидкість обертання електрона на цій орбіті.

Розв'язання

Відповідно до теорії Бора умова стаціонарних орбіт в атомі водню визначається співвідношенням

$$m_e v_n r_n = n\hbar, \quad (1)$$

де m_e – маса електрона, v_n – його швидкість, r_n – радіус орбіти, $\hbar$ – стала Планка, n – головне квантове число ($n = 1, 2, 3, \dots$), яке відповідає номеру орбіти.

Для п'ятої орбіти $n = 5$. Тоді (1) набуває вигляду

$$m_e v_5 r_5 = 5\hbar. \quad (2)$$

Під час обертання електрона навколо ядра сили взаємодії між електричними зарядами ядра та електрона надають останньому доцентрове прискорення. Згідно з другим законом Ньютона

$$\frac{m_e v_n^2}{r_n} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n^2},$$

або

$$m_e v_n^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n}. \quad (3)$$

З формули (2) знаходимо швидкість на п'ятій орбіті

$$v_5 = \frac{5\hbar}{m_e r_5}. \quad (4)$$

Підставляємо (4) у (3) і виражаємо радіус п'ятої орбіти

$$r_5 = \frac{100\hbar^2 \pi \epsilon_0}{m_e e^2}.$$

Відповідь: $r_5 = 1,31 \text{ нм}$, $v_5 = 0,45 \text{ Мм/с}$.

Задача 6. Найменша напруга на рентгенівській трубці, за якої з'являються K_α -лінії в спектрі характеристичного рентгенівського випромінювання, становить $U_{\min} = 8 \text{ кВ}$. Визначити, з якого матеріалу виготовлений анод цієї трубки. Обчислити частоту ν та енергію фотона, який належить до K_α -лінії у спектрі характеристичного випромінювання матеріалу анода.

Розв'язання

Рентгенівське випромінювання з'являється під час бомбардування анода трубки електронами, які випромінюються катодом, за рахунок енергії, що губиться під час гальмування електроном. Величина кванта $\hbar\omega$ не може перебільшувати енергію електрона. Тому квант випромінювання з'явиться тоді, коли його енергія дорівнюватиме мінімальній енергії електрона, який бомбардує анод. Отже,

$$\hbar\omega = eU_{\min},$$

де e – заряд електрона.

Звідси

$$U_{\min} = \hbar\omega/e. \quad (1)$$

Якщо енергія електрона достатня, щоб проникнути в глибину електронної оболонки атома, то він здатний вибити електрони, які належать внутрішнім електронним шарам атома. При цьому на фоні суцільного рентгенівського спектра з'являються лінії характеристичного випромінювання.

Частота лінії K_{α} -серії підпорядковується закону Мозлі

$$\omega_{K_{\alpha}} = \frac{3}{4}R(Z-1)^2, \quad (2)$$

де $R = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$ – стала Рідберга, Z – атомний номер елемента, який випромінює цей спектр.

Підставляючи в (1) частоту K_{α} -серії (2), отримаємо

$$U_{\min} = \frac{3\hbar}{4e}R(Z-1)^2.$$

Звідки

$$Z = 1 + 2\sqrt{eU_{\min}/3\hbar R}. \quad (3)$$

Підставляючи числові значення величин у формулу (3), знаходимо $Z = 29$. Отже, матеріалом анода є мідь.

Енергію фотона знайдемо за формулою

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

де $E_i = 2,18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$ – енергія іонізації атома водню.

Частота фотона

$$\nu = \varepsilon/h,$$

де $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.

Відповідь: Мідь, $\varepsilon_{K_{\alpha}} = 8,01 \text{ кеВ}$, $\nu = 19,3 \text{ ПГц}$.

Задача 7. Електрон рухається зі швидкістю $v = 212 \text{ Мм/с}$. Визначити довжину його хвилі де Бройля. Порівняти її з комптонівською довжиною хвилі.

Розв'язання

Оскільки швидкість електрона дорівнює $v = 2,12 \cdot 10^8 \text{ м/с}$, приходимо до висновку, що імпульс електрона теж релятивістський і має вигляд

$$p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (1)$$

де m_0 – маса спокою електрона.

Підставляючи (1) у формулу де Бройля, маємо

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

Відповідь: $\lambda = 2,426 \text{ пм}$. Тобто довжина хвилі де Бройля електрона дорівнює комптонівській довжині хвилі.

Задача 8. Мінімальний діаметр атома водню $l_{\min} = 124 \text{ пм}$. Застосовуючи співвідношення невизначеностей, знайти кінетичну енергію електрона у ньому.

Розв'язання

Співвідношення невизначеностей Гейзенберга має вигляд

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar. \quad (1)$$

Якщо діаметр атома l , тоді електрон знаходитиметься в атомі у межах області з невизначеністю

$$\Delta x = l/2.$$

Тоді співвідношення (1) можна записати

$$l \geq 2\hbar/\Delta p. \quad (2)$$

Невизначеність імпульсу не може перебільшувати значення самого імпульсу, тобто

$$\Delta p \leq p.$$

Імпульс пов'язаний з кінетичною енергією електрона співвідношенням

$$p = \sqrt{2mT}.$$

Замінімо Δp значенням $\sqrt{2mT}$, а l на $l_{\min}$ і перейдемо від нерівності (2) до рівності. В результаті маємо

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

Звідки

$$T = \frac{2\hbar^2}{ml_{\min}^2}.$$

Відповідь: $T = 10$ еВ.

Задача 9. Протон знаходиться в нескінченно глибокій одновимірній прямокутній потенціальній ямі шириною $l = 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$ у збудженому стані ($n = 5$). Знайти: 1) різницю енергій між рівнями $n = 6$ і $n = 5$; 2) нормувальний коефіцієнт хвильової функції, яка описує стан протона у потенціальній ямі; 3) імовірність того, що протон знаходиться в ямі в інтервалі $\frac{l}{5} < x < \frac{2l}{5}$.

Розв'язання

Для розв'язання задачі запишемо рівняння Шредінгера для стаціонарних станів

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi = 0, \quad (1)$$

де Δ – оператор Лапласа, ψ – хвильова функція, E – повна енергія частинки, U – потенціальна енергія силового поля, в якому рухається частинка, $\hbar$ – стала Планка.

У випадку одновимірної нескінченно глибокої потенціальної ями, в якій рухається протон ($m = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$), рівняння (1) набуває вигляду

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

Потенціальна яма має вигляд, зображений на рис 3.1

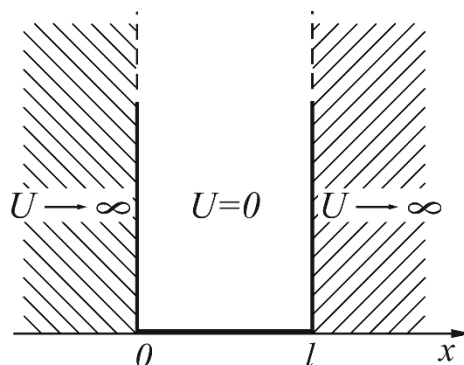


Рисунок 3.1

Потенціальна енергія U дорівнює нулю при $0 \leq x \leq l$ і перетворюється в нескінченність при $x < 0$ і $x > l$.

За межі потенціальної ями протон потрапити не може, тому імовірність виявлення його зовні дорівнює нулю. А з умови безперервності випливає, що хвильова функція Ψ має бути рівною нулю і на межах ями, тобто

$$\psi(0) = \psi(l) = 0. \quad (2)$$

Всередині ями, тобто при $0 \leq x \leq l$, $U = 0$, рівняння Шредінгера має вигляд

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi = 0. \quad (3)$$

Позначимо

$$\frac{2m}{\hbar^2} E = k^2, \quad (4)$$

і запишемо (3) у вигляді

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

Розв'язком цього рівняння є

$$\psi(x) = A \sin(kx + \alpha). \quad (5)$$

З умови (2) знайдемо сталі k і α .

Передусім з умови $\psi(0) = 0$ отримаємо

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

звідки випливає, що $\alpha = 0$.

З другої граничної умови $\psi(l) = 0$ маємо

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

і знаходимо, що це можливо лише при

$$kl = \pm n\pi, \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (6)$$

(випадок $n = 0$ не може бути реалізованим, бо це означає, що протон ніде не знаходиться).

З рівнянь (5) і (10) знаходимо

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

1) Знайдемо різницю двох сусідніх рівнів з квантовими числами $n = 6$ і $n = 5$

$$E_n = E_{n+1} - E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} [(n+1)^2 - n^2] = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} (2n+1).$$

2) Для знаходження нормувального коефіцієнта A підставимо в (5) значення k , яке отримуємо з (6). В результаті маємо власні функції

$$\psi_n(x) = A \sin \frac{n\pi x}{l}. \quad (7)$$

Скористаємось умовою нормування

$$\int_V \Psi^* \Psi dV = 1,$$

яку в даному випадку запишемо так

$$A^2 \int_0^l \sin^2 \frac{n\pi x}{l} dx = 1. \quad (8)$$

Візьмемо інтеграл з лівої частини рівності

$$\begin{aligned} \int_0^l \sin^2 \frac{n\pi x}{l} dx &= \int_0^l \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{2n\pi x}{l} \right) dx = \frac{1}{2} \int_0^l dx - \frac{1}{2} \int_0^l \cos \frac{2n\pi x}{l} dx = \\ &= \frac{1}{2} \left[x \Big|_0^l - \frac{l}{2n\pi} \sin \frac{2n\pi x}{l} \Big|_0^l \right] = \frac{1}{2} l. \end{aligned}$$

З урахуванням (8) умова нормування набуває вигляду

$$A^2 \frac{l}{2} = 1.$$

Звідки

$$A = \sqrt{2/l}. \quad (9)$$

3) Знайдемо імовірність того, що протон знаходиться в потенціальній ямі в межах $\frac{l}{5} \leq x \leq \frac{2l}{5}$.

Враховуючи, що протон перебуває у збудженому стані ($n=5$), хвильова функція, яка описує його стан, згідно з (7) і (9) має вигляд

$$\psi_5(x) = \sqrt{2/l} \sin \frac{5\pi}{l} x.$$

Імовірність виявлення протона в заданих межах ями знайдемо за формулою

$$\begin{aligned} W &= \int_{l/5}^{2l/5} |\psi_5|^2 dx = \int_{l/5}^{2l/5} \frac{2}{l} \sin^2 \frac{5\pi x}{l} dx = \frac{2}{l} \int_{l/5}^{2l/5} \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{10\pi x}{l} \right) dx = \\ &= \frac{1}{l} \int_{l/5}^{2l/5} dx - \frac{1}{l} \int_{l/5}^{2l/5} \cos \frac{10\pi x}{l} dx = \frac{x}{l} \Big|_{l/5}^{2l/5} - \frac{1}{10\pi} \sin \frac{10\pi x}{l} \Big|_{l/5}^{2l/5}. \end{aligned}$$

Відповідь: $\Delta E_{6,5} = 22,25 \text{ eV}$, $A = 1,43 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$, $W = 0,2$.

3.6 Задачі для самостійного розв'язання

3.1 Вважаючи, що муфельна піч випромінює як абсолютно чорне тіло і розсіює стінками 70% потужності, визначити температуру її внутрішньої поверхні з відкритим оглядовим отвором площею $S = 20 \text{ см}^2$, якщо потужність, яка споживається піччю, дорівнює $P = 1,4 \text{ кВт}$.

Відповідь: $T = 1386 \text{ К}$.

3.2 Термодинамічна температура абсолютно чорного тіла зросла у 3 рази. Визначити, у скільки разів збільшилася при цьому його енергетична світність. У скільки разів і як змінилася довжина хвилі, яка відповідає максимуму його випромінювальної здатності?

Відповідь: 1) $R_{e2}/R_{e1} = 81$ раз; 2) Зменшилась у 3 рази.

3.3 Визначити температуру плавильної печі, якщо з оглядового віконця площею $S = 10 \text{ см}^2$ за час $t = 2 \text{ хв}$ випромінюється енергія $W = 8 \text{ кДж}$.

Відповідь: $T = 1041 \text{ К}$.

3.4 Куля радіусом $R = 8 \text{ см}$ випромінює як сіре тіло. При сталій температурі кулі $T = 1000 \text{ К}$ потужність випромінювання $P = 800 \text{ Вт}$. Визначити коефіцієнт чорноти кулі.

Відповідь: $\alpha = 0,18$.

3.5 Довжина хвилі, на яку припадає максимум випромінювальної здатності, збільшилась на $\Delta\lambda = 600 \text{ нм}$ під час охолодження абсолютно чорного тіла. Термодинамічна температура тіла при цьому зменшилась у три рази. Знайти: 1) початкову і кінцеву температури; 2) довжини хвиль, на які приходяться максимуми випромінювальної здатності на цих температурах; 3) у скільки разів змінилася випромінювальна здатність; 4) у скільки разів змінилася максимальна спектральна густина випромінювальності?

Відповідь: 1) $T_1 = 9,66 \text{ кК}$, $T_2 = 3,22 \text{ кК}$;

2) $\lambda_1 = 300 \text{ нм}$, $\lambda_2 = 900 \text{ нм}$;

3) $R_{e1}/R_{e2} = 81$;

4) $r_{e\text{max}_1}/r_{e\text{max}_2} = 243$.

3.6 Довжина хвилі, на яку приходить максимум випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла, зменшилась у три рази зі збільшенням його температури від T_1 до T_2 . Визначити, у скільки разів і як зміниться площа, що обмежена графіком функції випромінювальної здатності тіла від довжини хвилі.

Відповідь: збільшиться у 81 раз.

3.7 Знайти температуру куба з ребром $a = 20$ см, якщо випромінювальна потужність куба $P = 2$ кВт, а коефіцієнт чорноти $\alpha = 0,2$.

Відповідь: $T = 926$ К.

3.8 До мідного циліндра довжиною $l = 4$ см і діаметром $d = 2$ см підводиться тепло потужністю $P = 0,2$ Вт, в результаті чого температура циліндра підтримується сталою і рівною $t = 17^\circ\text{C}$. Визначити температуру простору, оточуючого циліндр. Поглинальна здатність міді $\alpha_T = 0,6$.

Відповідь: $t_0 = -5^\circ\text{C}$.

3.9 По дроту діаметром $d = 1$ мм та питомим опором $\rho = 9,2 \cdot 10^{-7}$ Ом·м протікає струм $I = 5$ А. Температура оточуючого дрот середовища $t = 17^\circ\text{C}$. Температура дроту підтримується сталою $t = 727^\circ\text{C}$. Знайти поглинальну здатність дроту, вважаючи його поверхню сірою.

Відповідь: $\alpha_T = 0,165$.

3.10 На вольфрам падає світло з довжиною хвилі $\lambda = 200$ нм. Визначити найменшу затримуючу напругу, за якої фотострум припиниться, якщо робота виходу з вольфраму $A = 4,52$ еВ.

Відповідь: $U_z = 1,695$ В.

3.11 Затримуюча напруга для калієвої пластинки $U_1 = 0,91$ В. Робота виходу електронів з калію $A_1 = 2,2$ еВ. За тих самих умов для іншої пластинки затримуюча напруга дорівнює $U_2 = 3$ В. Визначити роботу виходу з другої пластинки.

Відповідь: $A_2 = 0,11$ еВ.

3.12 Зірка масою $m = 1,98 \cdot 10^{30}$ кг і радіусом $R = 6,95 \cdot 10^8$ м випромінює як абсолютно чорне тіло. Максимум випромінювальної здатності зірки приходить на довжину хвилі $\lambda = 480$ нм. Знайти її максимальну випромінювальну здатність $r_e(\lambda, T)_{\max}$ і час t , за який зірка втратить свою масу внаслідок випромінювання електромагнітних хвиль.

Відповідь: $r_e(\lambda, T)_{\max} = 1,04 \cdot 10^{14}$ Вт/м, $t = 1,24 \cdot 10^{13}$ років.

3.13 Максимальна швидкість електронів, які вириваються з деякого металу світлом з довжиною хвилі $\lambda = 500$ нм, дорівнює $v_{\max} = 540$ км/с. Визначити червону межу фотоефекту.

Відповідь: $\lambda_0 = 748$ нм.

3.14 Робота виходу із срібла $A = 4,7$ еВ. На пластинку із срібла падає монохроматичне світло з довжиною хвилі $\lambda = 208$ нм. Визначити максимальний імпульс, який передається поверхні срібла під час вилітання електрона.

Відповідь: $p_{\max} = 6,1 \cdot 10^{-25}$ кг·м/с.

3.15 Робота виходу з вольфраму $A = 4,52$ еВ. На пластинку з вольфраму падає γ -випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 1$ пм. Визначити максимальну швидкість фотоелектронів, які вириваються з поверхні вольфраму.

Відповідь: $v_{\max} = 287$ Мм/с.

3.16 На абсолютно чорну поверхню $S = 2$ м², яка розташована перпендикулярно падаючим променям монохроматичного світла, щосекунди падає $N = 8 \cdot 10^{19}$ фотонів. Тиск, який спричиняє світло на поверхню $p = 0,1$ мкПа. Визначити довжину хвилі світла.

Відповідь: $\lambda = 265,2$ нм.

3.17 Під час розсіяння вузького пучка монохроматичного рентгенівського випромінювання на речовині (на вільних електронах) виявилось, що довжини хвиль розсіяного під кутами $\theta_1 = 45^\circ$ і $\theta_2 = 90^\circ$ випромінювання відрізняються у два рази. Визначити довжину хвилі падаючого випромінювання.

Відповідь: $\lambda = 1,01$ пм.

3.18 Тиск монохроматичного світла з довжиною хвилі $\lambda = 400$ нм на ідеально відбиваючу поверхню площею $S = 80 \text{ см}^2$, розташовану нормально до падаючого випромінювання, дорівнює $p = 0,2$ мкПа. Визначити число фотонів, які падають на поверхню за одну секунду.

Відповідь: $N = 4,85 \cdot 10^{17}$.

3.19 Фотон розсіявся на вільному електроні, який знаходився у стані спокою. В результаті цього довжина хвилі розсіяного фотона збільшилася на 15%, а кінетична енергія електрона віддачі складала 45 кеВ. Визначити енергію фотона до розсіювання на електроні.

Відповідь: $\varepsilon = 0,346 \text{ МеВ}$.

3.20 В результаті ефекту Комптона фотон з енергією $\varepsilon = 0,5 \text{ МеВ}$ під час зіткнення з вільним електроном розсіявся під кутом $\theta = 60^\circ$. Знайти енергію ε' розсіяного фотона.

Відповідь: $\varepsilon' = 0,336 \text{ МеВ}$.

3.21 На четвертій орбіті атома водню рухається електрон. Визначити орбітальний магнітний момент електрона, застосовуючи теорію Бора.

Відповідь: $p_m = 3,69 \cdot 10^{23} \text{ А} \cdot \text{м}^2$.

3.22 Визначити швидкість і частоту обертання електрона на четвертій орбіті атома водню та еквівалентний електричний струм.

Відповідь: $v_4 = 0,55 \text{ Мм/с}$, $\nu = 1,03 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$, $I = 16,5 \text{ мкА}$.

3.23 Визначити період обертання електрона на третій орбіті атома водню та еквівалентний електричний струм.

Відповідь: $T = 4,1 \text{ фс}$, $I = 39 \text{ мкА}$.

3.24 Частота світла, яку випромінює атом водню під час переходу електрона на рівень з головним квантовим числом $n = 3$, дорівнює $\nu = 3,29 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$. Визначити, у скільки разів змінився при цьому радіус орбіти електрона.

Відповідь: у 10 разів.

3.25 Електрон переходить із збудженого стану в основний і випромінює фотон з довжиною хвилі $\lambda = 102,6$ нм. Визначити, на якій орбіті знаходився електрон. Обчислити радіус цієї орбіти і орбітальний механічний момент електрона, коли він знаходився на даній орбіті.

Відповідь: $n = 3$, $r_3 = 0,476$ нм, $L_l = 3,15 \cdot 10^{34}$ Дж·с.

3.26 Електрон обертається в атомі водню з частотою $\nu = 8,22 \cdot 10^{14}$ Гц. Визначити, на якій орбіті знаходиться цей електрон.

Відповідь: $n = 2$.

3.27 На атом водню падає фотон і вибиває з нього електрон. Кінетична енергія електрона дорівнює $T = 3,22$ еВ. Чому дорівнює довжина хвилі такого світла, якщо атом знаходиться у першому збудженому стані?

Відповідь: $\lambda = 187,5$ нм.

3.28 Зі зменшенням різниці потенціалів у три рази короткохвильова межа суцільного рентгенівського спектра змінилася на $\Delta\lambda = 50$ пм. Знайти початкову і кінцеву довжини хвиль короткохвильової межі даного спектра.

Відповідь: $\lambda_{1\min} = 25$ пм, $\lambda_{2\min} = 75$ пм.

3.29 Максимальна швидкість електронів, що долітають до анода рентгенівської трубки, дорівнює $v_{\max} = 18$ Мм/с. Визначити довжину хвилі короткохвильової межі рентгенівського спектра.

Відповідь: $\lambda_{\min} = 1,35$ нм.

3.30 Рентгенівська трубка має анод з ніобію. Яку напругу до неї прикладено, якщо різниця довжини хвиль K_{α} -лінії та короткохвильової межі суцільного спектра дорівнює 20 пм?

Відповідь: $U = 22,3$ кВ.

3.31 Електрон в атомі водню переходить з шостої орбіти на другу. Як змінюється при цьому довжина хвилі де Бройля?

Відповідь: $\frac{\lambda_6}{\lambda_2} = 3$.

3.32 Електрон був прискорений різницею потенціалів $U = 600 \text{ В}$. Визначити довжину хвилі де Бройля для цього електрона.

Відповідь: $\lambda = 50,1 \text{ пм}$.

3.33 Для електрона, який знаходиться в атомі водню, довжина хвилі де Бройля $\lambda = 1,27 \text{ нм}$. Визначити номер цієї орбіти і радіус.

Відповідь: $n = 4$, $r = 0,85 \text{ нм}$.

3.34 Для нейтрона, який рухається в середовищі з найбільш імовірною швидкістю, довжина хвилі де Бройля $\lambda = 177 \text{ пм}$. Знайти температуру $t^\circ \text{C}$ оточуючого середовища.

Відповідь: $t = 30^\circ \text{C}$.

3.35 Знайти довжину хвилі де Бройля для протонів, кінетична енергія яких $T_1 = 1 \text{ еВ}$, $T_2 = 1 \text{ кеВ}$, $T_3 = 1 \text{ МеВ}$.

Відповідь: $\lambda_1 = 28,7 \text{ пм}$, $\lambda_2 = 0,91 \text{ пм}$, $\lambda_3 = 28,7 \text{ фм}$.

3.36 Електрон рухається в однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,1 \text{ Тл}$ по колу радіусом $R = 5 \text{ см}$. Визначити довжину хвилі де Бройля для електрона і швидкість його обертання.

Відповідь: $\lambda = 82,9 \text{ фм}$, $v = 8,8 \text{ Гм/с}$.

3.37 Короткохвильова межа гальмівного рентгенівського спектра, виникаючого під час бомбардування анода рентгенівської трубки електронами, дорівнює $\lambda_{\min} = 2 \text{ нм}$. Визначити довжину хвилі де Бройля електронів.

Відповідь: $\lambda = 49,2 \text{ пм}$.

3.38 Відношення ширини енергетичного рівня, на якому знаходиться збуджений електрон, до енергії, що випромінює атом, складає $\Delta E / E = 1,5 \cdot 10^{-7}$. Приймаючи, що час життя збудженого стану $\Delta t = 10^{-8} \text{ с}$, знайти довжину хвилі випромінюваного атомом фотона.

Відповідь: $\lambda = 0,45 \text{ мкм}$.

3.39 Визначити невизначеність координати електрона, який рухається в атомі водню по другій борівській орбіті, якщо невизначеність швидкості складає 15% від її числового значення.

Відповідь: $\Delta x = 4,43 \text{ нм}$.

3.40 Визначити відносну неточність $\Delta p / p$ імпульсу протона, кінетична енергія якого $T = 1 \text{ кеВ}$, якщо ширина його сліду в камері Вільсона дорівнює $\Delta x = 1 \text{ мкм}$.

Відповідь: $\Delta p / p = 9,06 \cdot 10^{-7}$.

3.41 Електрон у збудженому стані ($n = 4$) знаходиться в одновимірній, прямокутній, нескінченно глибокій потенціальній ямі шириною l . Визначити імовірність виявлення електрона в першій чверті ями.

Відповідь: $W = 0,25$.

3.42 Частинка в основному стані знаходиться в одновимірній, прямокутній, нескінченно глибокій потенціальній ямі шириною l . Визначити імовірність виявлення частинки у лівій чверті ями.

Відповідь: $W = 0,09$.

3.43 Частинка у збудженому стані ($n = 2$) знаходиться в одновимірній, прямокутній, нескінченно глибокій потенціальній ямі шириною l . Визначити імовірність виявлення частинки у третій чверті ями.

Відповідь: $W = 0,25$.

3.44 Частинка у збудженому стані ($n = 4$) знаходиться в одновимірній, прямокутній, нескінченно глибокій потенціальній ямі шириною l . Визначити, в яких точках ями густина імовірності виявлення частинки буде максимальною і мінімальною.

Відповідь: Максимуми: $x = \frac{l}{8}, \frac{3l}{8}, \frac{5l}{8}, \frac{7l}{8}$. Мінімуми: $x = 0, \frac{l}{4}, \frac{l}{2}, \frac{3l}{4}, l$.

3.45 Визначити, у скільки разів зміниться відношення різниці енергій сусідніх енергетичних рівнів до енергії «нижнього» стану $\frac{\Delta E_{n+1,n}}{E_n}$ частинки, яка

знаходиться в одновимірній, прямокутній, нескінченно глибокій потенціальній ямі шириною l під час переходу цієї частинки із стану $n = 4$ у стан $n' = 10$.

Відповідь: зменшиться у 2,68 рази.

3.46 За якого відношення висоти U потенціального бар'єру до енергії електрона, що падає на бар'єр, коефіцієнт відбиття $\rho = 0,25$?

Відповідь: $\frac{U}{E} = 0,89$.

3.47 Визначити ширину одновимірної, прямокутної потенціальної ями з нескінченно високими стінками, якщо електрон знаходиться у збудженому стані ($n = 4$), і дискретність його енергетичного спектра порівняна з його середньою кінетичною енергією за температури $t = 20^\circ \text{C}$.

Відповідь: $l = 9,4 \text{ нм}$.

3.48 Протон рухається в одновимірній, прямокутній потенціальній ямі нескінченної глибини. Знайти ширину ями, якщо різниця між четвертим і третім збудженими станами дорівнює $0,5 \text{ еВ}$.

Відповідь: $l = 53,3 \text{ пм}$.

3.49 Хвильова функція частинки має вигляд $\psi(x) = A \sin\left(\frac{3\pi x}{l}\right)$

і визначена в області $0 \leq x \leq l$. Знайти нормувальний коефіцієнт A .

Відповідь: $A = \sqrt{\frac{2}{l}}$.

3.50 Хвильова функція частинки має вигляд $\psi(r) = \frac{A}{r} \sin kr$, де

r – відстань цієї частинки до силового центра, k – деяка стала величина. Визначити нормувальний коефіцієнт A . Хвильова функція визначена лише в області $0 \leq r \leq R$, де R – радіус цієї області.

Відповідь: $A = \frac{1}{\sqrt{2\pi \left(R - \frac{1}{2k} \sin 2kR \right)}}$.

4 ОСОБЛИВОСТІ ВИКОНАННЯ ТА ОФОРМЛЕННЯ КОНТРОЛЬНИХ РОБІТ

Кожен здобувач вищої освіти заочної форми навчання протягом міжсесійного періоду має виконати одну або дві контрольних роботи з фізики залежно від кількості навчальних годин, які відводяться на вивчення предмету, та є різними для різних спеціальностей.

Нижче наведені таблиці 4.1–4.2 з варіантами контрольних робіт за кожним з основних розділів. Загалом у кожній контрольній наведено 10 варіантів. Номер варіанта, що виконується здобувачем вищої освіти, визначається за його номером в академічному журналі групи. Якщо номер у журналі більше 10, то номер варіанта обирається за коловим принципом: здобувач вищої освіти з 11-м номером обирає 1-й варіант, з 12-м – 2-й варіант, з 13-м – 3-й варіант тощо. Нумери задач, які розміщені в таблиці варіантів, відповідають номерам задач, що знаходяться у кожному з основних розділів.

Таблиця 4.1 – Завдання до контрольної роботи №4

Варіант	Номери контрольних задач									
1	1.1	1.11	1.21	1.31	1.41	1.51	1.61	1.71	1.81	1.91
2	1.2	1.12	1.22	1.32	1.42	1.52	1.62	1.72	1.82	1.92
3	1.3	1.13	1.23	1.33	1.43	1.53	1.63	1.73	1.83	1.93
4	1.4	1.14	1.24	1.34	1.44	1.54	1.64	1.74	1.84	1.94
5	1.5	1.15	1.25	1.35	1.45	1.55	1.65	1.75	1.85	1.95
6	1.6	1.16	1.26	1.36	1.46	1.56	1.66	1.76	1.86	1.96
7	1.7	1.17	1.27	1.37	1.47	1.57	1.67	1.77	1.87	1.97
8	1.8	1.18	1.28	1.38	1.48	1.58	1.68	1.78	1.88	1.98
9	1.9	1.19	1.29	1.39	1.49	1.59	1.69	1.79	1.89	1.99
10	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	1.100

Таблиця 4.2 – Завдання до контрольної роботи №5

Варіант	Номери контрольних задач								
1	2.1	2.11	2.21	3.1	3.11	3.21	3.31	3.41	
2	2.2	2.12	2.22	3.2	3.12	3.22	3.32	3.42	
3	2.3	2.13	2.23	3.3	3.13	3.23	3.33	3.43	
4	2.4	2.14	2.24	3.4	3.14	3.24	3.34	3.44	
5	2.5	2.15	2.25	3.5	3.15	3.25	3.35	3.45	
6	2.6	2.16	2.26	3.6	3.16	3.26	3.36	3.46	
7	2.7	2.17	2.27	3.7	3.17	3.27	3.37	3.47	
8	2.8	2.18	2.28	3.8	3.18	3.28	3.38	3.48	
9	2.9	2.19	2.29	3.9	3.19	3.29	3.39	3.49	
10	2.10	2.20	2.30	3.10	3.20	3.30	3.40	3.50	

Для того, щоб розв'язати задачі з контрольних робіт, здобувачу вищої освіти спочатку необхідно опанувати відповідний теоретичний матеріал за підручниками та навчальними посібниками, а також звернути особливу увагу на основні закони й формули, що наведені на початку кожного розділу цих методичних вказівок. Після цього треба розібрати приклади розв'язання задач, які належать до відповідного розділу і лише тоді починати самостійно розв'язувати задачі.

Контрольна робота виконується у вигляді звіту, який оформлюється рукописним або друкованим (за допомогою текстового редактора) способом, та обов'язково має містити титульний аркуш, відповідно до зразка.

Харківський національний університет радіоелектроніки
кафедра фізики

Кафедра Фізики

Контрольна робота
з фізики
2-й семестр

Виконав:
студент групи ПЗПЗ-25-1
ПІБ

Перевірив:

Харків 2026

Якщо звіт виконується у рукописному вигляді, то він має бути виконаний у зошиті в клітинку, або на аркушах формату А4. Якість рукопису має бути достатньою для візуального сприйняття існуючої інформації – все має бути чітко й розбірливе. Для зауважень на сторінках звіту залишаються поля.

Якщо звіт виконується у друкованому вигляді, то він має бути надрукованим на аркушах формату А4 відповідно до таких вимог: поля – верхнє, лівє, правє – 2 см, нижнє – 2,5 см. Текст набирається в одну колонку, абзацний відступ – 1,25 см, виключка (вирівнювання тексту) – по ширині сторінки, шрифт Times New Roman (Cyr), 14 кегль, міжрядковий інтервал – 1.

Формули набирають у редакторі формул (MathType, MS Equation тощо), використовуючи розміри: звичайний (змінна) – 14, великий індекс – 10, дрібний – 8, великий символ – 16, дрібний символ – 12. Рисунки можна виконувати вручну, а потім сканувати, фотографувати і вставляти їх у текст, або виконувати їх у будь-якому графічному редакторі.

На наступних аркушах наводяться розв’язання задач. Під час оформлення роботи зверніть увагу на наявність номера задачі, повної умови задачі, короткої умови та розв’язання.

За необхідності розв’язок може бути доповнений рисунком. Обов’язково супроводжуйте розв’язок задачі поясненнями до формул (наприклад: «запишемо закон збереження енергії») і до кожного математичного перетворення (наприклад, «проінтегруємо ліву та праву частини виразу»). Числові обчислення слід проводити тільки після того, як вирішення було доведено до кінцевого виразу.

Оформлений звіт здається викладачу у встановлений термін. У випадку дистанційної форми проведення занять контрольна робота звантажується у відповідний розділ на платформі DL у форматі PDF. При рукописному оформленні сторінки звіту фотографуються (на фото не має бути нічого зайвого) та з фото формується PDF-файл. Під час створення файлу за допомогою текстового редактора (MS Word тощо) поля повністю прибираються. Міністерство освіти і науки України

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Загальна фізика з прикладами і задачами. Ч. II. Електрика та магнетизм: навч. посібник / І. М. Кібець, А. І. Рибалка, В. О. Стороженко. – Х.: Компанія СМІТ, 2009. – 424 с.
2. Загальна фізика з прикладами і задачами. Ч. III, т. 1. Оптика: навч. посібник / І. М. Кібець, А. І. Рибалка, В. О. Стороженко. – Х. : Компанія СМІТ, 2014. – 232 с.
3. Загальна фізика з прикладами і задачами [Текст]. Ч. III, т. 2. Квантова та атомна фізика. Фізика твердого тіла. Ядерна фізика: навч. посібник / І. М. Кібець, А. І. Рибалка, В. О. Стороженко. — Х.: Компанія СМІТ, 2014. – 304 с.
4. Електромагнетизм. Хвилі. Оптика: Навч. посібник / Упоряд. Українець М.І. та ін. – Харків: ХТУРЕ, 2000. – 164 с.
5. Квантова та ядерна фізика: Навч. посібник / Упоряд. Українець М.І. та ін. – Харків: ХНУРЕ, 2005. – 124 с.
6. Курс загальної фізики. Навчальний посібник для вищих навчальних закладів / В.В. Кармазін, В.В. Семенець – К.: Кондор, 2009. – 786 с.
7. Загальний курс фізики. Збірник задач: навч. посіб. для студ. інженерно-технічних і пед. спец. вищ. навч. закладів / І. П. Гарукша та ін. – К. : Техніка, 2003. – 560 с.

ДОДАТОК А

Основні фізичні сталі та астрономічні величини

Таблиця А.1 – Основні фізичні сталі

Стала	Позначення	Числове значення
Прискорення вільного падіння	g	$9,81 \text{ м/с}^2$
Гравітаційна стала	G	$6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Стала Авогадро	N_A	$6,62 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Універсальна газова стала	R	$8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$
Молярний об'єм ідеального газу за нормальних умов	V_0	$22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{моль}$
Нормальний атмосферний	p_0	$1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$
Стала Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Стала Фарадея	F	$9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$
Елементарний заряд	e	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Маса спокою електрона	m_e	$9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 5,49 \cdot 10^{-4} \text{ а.о.м}$
Маса спокою протона	m_p	$1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00728 \text{ а.о.м}$
Маса спокою нейтрона	m_n	$1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00866 \text{ а.о.м}$
Питомий заряд електрона	$ e / m_e$	$1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$
Електрична стала	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Магнітна стала	$\mu_0 = \frac{1}{\epsilon_0 c^2}$	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Швидкість світла в вакуумі	c	$2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Стала Стефана–Больцмана	σ	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Стала Планка	h	$6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Стала в законі зміщення Віна	b	$2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Стала в другому законі Віна	C	$1,3 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м}^2 \times \text{К}^5)$
Стала Рідберга	R_∞	$1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$
Борівський радіус	a_0	$5,29 \cdot 10^{-11} \text{ м}$
Комптонівська довжина хвилі	λ_e	$2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м/с}$
Магнетон Бора	μ_B	$9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}$
Ядерний магнетон	μ_N	$5,05 \cdot 10^{-27} \text{ Дж/Тл}$
Атомна одиниця маси	а.о.м	$1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Коефіцієнт пропорційності між масою і енергією	c^2	$8,99 \cdot 10^{16} \text{ Дж/кг}$

Таблиця А.2 – Деякі сталі для газів

Газ (відносна молекулярна маса M_r)	Діаметр молекули d , нм	Сталі Ван-дер-Ваальса		Критична температура $T_{кр}$, К	Критичний тиск $p_{кр}$, МПа
		$a, \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^6}{\text{моль}^2}$	$b \cdot 10^{-6}, \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$		
$H_2(2)$	0,27	0,024	27	33	1,3
$He(4)$	0,20	—	—	5,2	0,23
$H_2O(18)$	0,30	0,554	30	647	22,1
$Ne(20)$	0,26	—	—	44,4	2,72
$N_2(28)$	0,37	0,137	39	126	3,39
$O_2(32)$	0,35	0,137	32	155	5,08
$Ar(40)$	0,35	0,132	32	151	4,86
$CO_2(4)$	0,40	0,367	43	304	7,38
Повітря(29)	0,35	0,140	—	—	—

Таблиця А.3 – Основні астрономічні величини

Фізичні параметри	Сонце	Земля	Місяць
Маса, кг	$1,97 \cdot 10^{30}$	$6,96 \cdot 10^{24}$	$7,33 \cdot 10^{22}$
Радіус, м	$6,95 \cdot 10^8$	$6,37 \cdot 10^6$	$1,74 \cdot 10^6$
Середня густина, $\text{кг}/\text{м}^3$	1400	5518	3350
Середня відстань від Землі, км	$1,496 \cdot 10^8$	—	384 440

ДОДАТОК Б

Основні фізичні характеристики деяких речовин

Таблиця Б.1 – Густина речовини

Тверді тіла при 293 К		Рідини		Гази за нормальних умов $T_0 = 273,15 \text{ К}$, $p_0 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$	
Речовина	$\rho \cdot 10^3, \text{ кг/м}^3$	Речовина	$\rho \cdot 10^3, \text{ кг/м}^3$	Речовина	$\rho \cdot 10^3, \text{ кг/м}^3$
Алюміній	2,69	Бензол ($t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$)	879	Азот	1,250
Залізо, хімічно чисте	7,86	Вода ($t = +4 \text{ }^\circ\text{C}$)	1000	Водень	0,089
Латунь	8,3–8,7	Вода ($t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$)	958	Вуглекислий газ	1,977
Лід ($0 \text{ }^\circ\text{C}$)	0,91	Гас ($t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$)	800	Гелій	0,178
Мідь електро- літична	8,88–8,96	Гліцерин ($t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$)	1260	Кисень	1,429
Нікель	8,4–9,2	Рицинова олія ($t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$)	950	Метан	0,717
Олово лите	7,23	Скипидар ($t = 16 \text{ }^\circ\text{C}$)	858	Неон	0,900
Сталь лита	7,7–8,0	Спирт етилловий ($t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$)	789	Повітря	1,293
Свинець	11,22– 11,44	Спирт метилловий ($t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$)	792		
Срібло	10,42– 10,57	Толуол ($t = 18 \text{ }^\circ\text{C}$)	870		
Цинк	6,86–7,24	Ртуть ($t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$)	13 596		
Чавун	6,6–7,3				

Таблиця Б.2 – Фізичні характеристики рідин

Рідина	Коефіцієнт поверхневого натягу при 20°C $\sigma \cdot 10^{-3}$, Н/м	Коефіцієнт внутрішнього тертя при 20°C $\eta \cdot 10^{-3}$, Па · с	Коефіцієнт об'ємного розширення при 20°C $\beta \cdot 10^{-5}$, К ⁻¹	Точка кипіння при $p_0 = 1,01 \cdot 10^5$ Па t_k , °C
Бензол	30	0,673	124	80,2
Вода	72,6	1,005	21	100,0
Гліцерин	66	1,480	50	290,0
Олія рицинова	36,4	970	—	—
Ртуть	500,0	1,590	18	356,7
Спирт етиловий	22,0	1,2	110	78,3

Рідина	Питома теплота пароутворення $r \cdot 10^5$ Дж/кг	Коефіцієнт теплопровідності при 20°C $\chi \cdot 10^{-2}$, В/(м · К)	Питома теплоємність $c \cdot 10^3$, Дж/(кг · К)
Бензол	3,94	—	1,71
Вода	22,6	60	4,18
Гліцерин	—	29	2,43
Олія рицинова	—	—	2,1
Ртуть	2,85	908	0,125
Спирт етиловий	8,57	17	2,43

Таблиця Б.3 – Питома теплота згоряння палива $\times 10^7$ Дж/кг

Бензин	4,61	Гас	4,61
Деревина	1,26	Нафта	4,61
Кам'яне вугілля	2,93	Спирт	2,93

Таблиця Б.4 – Фізичні параметри газів

Газ	Температурний коефіцієнт тиску $\beta \cdot 10^{-6}, \text{K}^{-1}$	Питома теплоємність при 0°C c_p , Дж/(кг · К)	C_p / C_v	Коефіцієнт теплопровідності при 0°C $\chi \cdot 10^{-3}, \text{Вт/(м · К)}$	Коефіцієнт внутрішнього тертя при 0°C $\eta \cdot 10^{-6}, \text{Па · с}$
Азот (N_2)	3674	$1,0 \cdot 10^3$	1,40	23,9	16,7
Водень (H_2)	3662	$1,43 \cdot 10^4$	1,40	169	8,4
Вуглекислий газ (CO_2)	3726	848	1,30	14,7	14,0
Гелій (He)	3660	5240	1,66	143	18,9
Кисень (O_2)	3674	913	1,40	24,5	19,2
Повітря сухе	3674	1011	1,40	24,1	17,5

Таблиця Б.5 – Швидкість звуку

Речовина	$v_{зв}, \text{м/с}$
Вода	1450
Повітря	332

Таблиця Б.6 – Пружні властивості твердих тіл

Матеріал	Модуль Юнга, $E \cdot 10^{10}, \text{Па}$	Модуль зсуву, $\sigma \cdot 10^{10}, \text{Па}$	Коефіцієнт Пуассона, μ	Границя міцності, $\sigma_m \cdot 10^8, \text{Па}$
Алюміній	6,1–7,4	2,2–2,6	0,33	0,98–3,90
Залізо коване	20–22	6,9–8,3	0,28	3,90–5,90
Сталі	20–22	7,8–8,1	0,28	4,9–15,7
Чавуни сірі, білі	7,4–17,6	4,9	0,23–0,27	1,17–1,27
Латунь	7,8–9,8	2,6–3,6	0,3–0,4	0,98–4,90
Мідь	1,0–13	3,8–4,7	0,31–0,40	1,56–4,41
Свинець	1,5–1,7	0,54	0,44	0,0196
Гетинакс	1,0–1,7	—	—	—
Текстоліт	0,14–0,28	—	—	—

Таблиця Б.7 – Теплофізичні характеристики твердих тіл

Матеріал	Температурний коефіцієнт лінійного розширення $\alpha \cdot 10^{-6}$, K^{-1}	Питома теплоємність при $18^{\circ}C$ $c \cdot 10^2$, Дж/(кг · К)	Коефіцієнт теплопровідності при $18^{\circ}C$, χ , Вт/(м · К)	Температура плавлення $t_{пл}$, $^{\circ}C$	Питома теплота плавлення $\lambda \cdot 10^5$, Дж/кг
Алюміній	23,8	9,2	200,6	660	3,8
Залізо	12,1	4,6	58,5	1539	2,7
Лід	51,0	20,9	2,5	0	3,35
Мідь	16,7	3,8	384,0	1083	1,8
Парафін	107–407	32,0	0,21	38–56	1,5
Свинець	29,3	1,2	34,7	327	0,25
Срібло	19,7	2,5	422,2	960,8	0,88
Ебоніт	84,0	—	0,17	—	—

Таблиця Б.8 – Питокий опір і температурний коефіцієнт опору (при $20^{\circ}C$)

Провідник	Питокий опір, нОм · м	Температурний коефіцієнт опору, K^{-1}
Алюміній	28	0,0038
Вольфрам	55	0,0051
Вугілля	40	0,0008
Графіт	8000	
Залізо	98	0,0062
Константа	480	0,00002
Мідь	17,2	0,0043
Нікелін	400	0,000017
Ніхром	980	0,00026
Ртуть	958	0,0009
Свинець	211	0,0042
Сталь	120	0,006

**Таблиця Б.9 – Діелектрична
проникність речовин**

Речовина	ϵ
Вода	81
Гас	2
Масло	2,2
Парафін	2
Парафіновий папір	3,7
Слюда	6
Скло	5,5 –10
Фарфор	6
Ебоніт	2,6

**Таблиця Б.10 – Робота виходу
електронів з металів, еВ**

Вольфрам	4,50
Залізо	4,74
Золото	4,68
Калій	2,00
Літій	2,40
Магній	3,46
Мідь	4,47
Молибден	4,20
Натрій	2,30
Нікель	5,00
Платина	5,29
Ртуть	4,52
Рубідій	2,13
Срібло	4,74
Тантал	4,07
Цезій	1,97
Цинк	4,00

Таблиця Б.11 – Робота іонізації, еВ

Азот	15,80
Аргон	15,70
Водень	15,40
Вуглекислий газ	14,40
Гелій	24,45
Кисень	13,56

**Таблиця Б.12 – Показники
заломлення (середні для видимого
проміння)**

Алмаз	2,42
Вода (20°C)	1,33
Кварц	1,54
Лід (-4°C)	1,31
Скипидар (20°C)	1,47
Скло	1,50

**Таблиця Б.13 Електрохімічні
еквіваленти (мг/Кл)**

Алюміній (Al^{+++})	0,093
Вісмут (Bi^{+++})	0,719
Залізо (Fe^{+})	0,289
Залізо (Fe^{++})	0,193
Золото (Au^{+})	2,043
Золото (Au^{++})	0,681
Мідь (Cu^{+})	0,660
Мідь (Cu^{++})	0,329
Нікель (Ni^{+})	0,304
Нікель (Ni^{++})	0,203
Срібло (Ag^{+})	1,118
Хром (Cr^{+++})	0,180
Цинк (Zn^{++})	0,338

Таблиця Б.14 – Основні характеристики деяких елементарних частинок

Частинка	Символ	Заряд, 10^{-19} Кл	Маса, 10^{-27} кг
α – частинка	${}^4_2\alpha$	3,2	6,6446
Нейтрон	${}_0^1n$	0	1,6748
Позитрон	${}_1^0e$	1,6	0,000911
Протон	${}_0^1p$	1,6	1,6724
Електрон	${}_{-1}^0e$	-1,6	0,000911

Таблиця Б.15 – Маса деяких ізотопів, а. о. м.

1_1H	1,00783	${}^{20}_{10}Ne$	19,99244	${}^{13}_7N$	13,00574
2_1D	2,01410	${}^{23}_{11}Na$	22,98977	${}^{14}_7N$	14,00307
3_1T	3,01605	${}^{24}_{11}Na$	23,99097	${}^{16}_8O$	15,99491
3_2He	3,01603	${}^{27}_{13}Al$	26,98154	${}^{31}_{15}P$	30,97376
4_2He	4,00260	${}^{28}_{13}Al$	27,97690	${}^{56}_{26}Fe$	55,93490
6_3Li	6,01512	${}^{28}_{14}Si$	27,97690	${}^{59}_{27}Fe$	58,93320
7_3Li	7,01600	${}^{30}_{14}Si$	29,97377	${}^{60}_{29}Ni$	59,9308
7_4Be	7,01693	9_4Be	9,01218	${}^{131}_{54}Xe$	130,9051
8_4Be	8,00531	${}^{10}_5B$	10,01294	${}^{235}_{92}U$	235,0493
${}^{17}_8O$	15,99491	${}^{11}_5B$	11,00930	${}^{238}_{92}U$	238,05353
${}^{19}_9F$	18,99840	${}^{12}_6C$	12,0		

Таблиця Б.16 – Періоди піврозпаду деяких радіоактивних речовин

Вісмут ${}^{210}_{83}Bi$	5,02 доби	Радон ${}^{222}_{86}Rn$	3,82 доби
Іридій ${}^{192}_{77}Ir$	75 діб	Стронцій ${}^{90}_{38}Sr$	28 років
Кальцій ${}^{45}_{20}Ca$	164 доби	Торій ${}^{232}_{90}Th$	$1,39 \cdot 10^{11}$ років
Натрій ${}^{24}_{11}Na$	15,3 год	Уран ${}^{235}_{92}U$	$7,1 \cdot 10^8$ років
Полоній ${}^{210}_{84}Po$	138 діб	Уран ${}^{238}_{92}U$	$4,5 \cdot 10^9$ років
Радій ${}^{226}_{88}Ra$	1600 років		

Таблиця Б.17 – Дебаївські температури деяких елементів

Елемент	<i>Li</i>	<i>Be</i>	<i>Bi</i>	<i>K</i>	<i>Mg</i>	<i>Ar</i>	<i>Ne</i>	<i>B</i>	<i>Au</i>	<i>C</i> (алмаз)
Дебаївська температура θ_D, K	400	1000	120	100	318	85	63	1250	170	1860

Таблиця Б.18 – Критична температура та критична напруженість (при θ_D, K) магнітного поля для переходу деяких металів у надпровідний стан

Метал	Критична температура T_c, K	Критична напруженість магнітного поля $H_c(0) \cdot 10^3, A/m$
<i>Pb</i>	7,19	63,93
<i>Cd</i>	0,56	2,39
<i>Al</i>	1,196	7,88
<i>Sn</i>	3,72	24,28
<i>In</i>	3,40	23,33
<i>Nb</i>	9,26	157,64
<i>Ga</i>	1,091	4,06
<i>Zn</i>	0,875	4,22
<i>Ti</i>	0,39	7,96
<i>Ta</i>	4,48	66,01

Таблиця Б.19 – Ширина забороненої зони (енергія активації) деяких власних напівпровідників

Елемент	<i>Si</i>	<i>Ge</i>	<i>Se</i>
Ширина забороненої зони, <i>eV</i>	1,12	0,67	1,8

Таблиця Б.20 – Ширина забороненої зони (енергія активації) деяких домішкових напівпровідників

Домішка Елемент	<i>B</i>	<i>In</i>	<i>P</i>	<i>Al</i>	<i>As</i>
<i>Si</i>	0,046	0,16	0,044	0,057	0,049
<i>Ge</i>	0,0104	0,0112	0,0120	0,0102	0,0127

ДОДАТОК В

Корисна інформація під час вивчення фізичної літератури

**Таблиця В.1 –
Латинський
алфавіт**

A, a – а
B, b – бе
C, c – це
D, d – де
E, e – е
F, f – еф
G, g – ге
H, h – аш
I, I – і
J, j – йот
K, k – ка
L, l – ель
M, m – ем
N, n – ен
O, o – о
P, p – пе
Q, q – ку
R, r – ер
S, s – ес
T, t – те
U, u – у
V, v – ве
W, w – дубль-ве
X, x – ікс
Y, y – ігрек
Z, z – зет

**Таблиця В.2 –
Грецький
алфавіт**

A, α – альфа
B, β – бета
Γ, γ – гамма
Δ, δ – дельта
Z, ζ – дзета
Η, η – ета
Θ, θ – тета
I, ι – йота
K, κ – каппа
Λ, λ – лямбда
M, μ – мю
N, ν – ню
Ξ, ξ – ксі
O, ο – омікрон
Π, π – пі
P, ρ – ро
Σ, σ – сигма
T, τ – тау
Υ, υ – іпсилон
Φ, φ – фі
X, χ – хі
Ψ, ψ – псі
Ω, ω – омега

**Таблиця В.3 –
Множники і префікси для утворення
кратних і часткових одиниць**

Найменування	Позначення	Множник
екса	Е	10^{18}
пета	П	10^{15}
тера	Т	10^{12}
гіга	Г	10^9
мега	М	10^6
кіло	к	10^3
гекто	г	10^2
дека	да	10^1
деци	д	10^{-1}
санти	с	10^{-2}
мілі	м	10^{-3}
мікро	мк	10^{-6}
нано	н	10^{-9}
піко	п	10^{-12}
фемто	ф	10^{-15}
атто	а	10^{-18}

**Таблиця В.4 – Деякі сталі числа і
наближені формули**

Сталі числа	Наближені формули (при $\alpha < 1$)
$\pi = 3,1416$	$(1 \pm \alpha)^n \approx 1 \pm n\alpha$
$\pi^2 = 9,8696$	$e^\alpha \approx 1 + \alpha$
$\sqrt{\pi} = 1,7725$	$\ln(1 + \alpha) \approx \alpha$
$e = 2,7183$	$\sin \alpha \approx \alpha$
$\lg e = 0,4343$	$\cos \alpha \approx 1 - \alpha^2 / 2$
$\ln 10 = 2,3026$	$\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$

Електронне навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до практичних занять та самостійної роботи з дисципліни
«ФІЗИКА»
для здобувачів вищої освіти заочної форми навчання усіх спеціальностей

Частина 2
Електромагнетизм, Хвильова оптика, Квантова оптика і атомна фізика

Упорядники: КОВАЛЕНКО Олена Миколаївна
ОРЕЛ Роман Петрович
РИБАЛКА Антоніна Іванівна
СТОРОЖЕНКО Володимир Олександрович
МЕШКОВ Сергій Миколайович
КАЛІНІН Віталій Веніамінович
ОНИЩЕНКО Андрій Анатолійович
МЯГКИЙ Олександр Валерійович
ЧУБУКІН Олександр Сергійович
ПРИЙМАЧОВ Юрій Дмитрович

Відповідальний випусковий Ю.Д. Приймачов
Редактор О.Г. Троценко
Комп'ютерна верстка Л.Ю. Светайло

План 2025 (друге півріччя), поз. 36

Підп. до використання 20.06.2025. Формат pdf Обсяг даних 2,96 Мб.

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Науки, 14, E-mail: info@nure.ua

Підготовлено в редакційно-видавничому відділі ХНУРЕ
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №1409 від 26.06.2003