Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет

ФІЗИКА

Методичні вказівки до виконання КПІЗ
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
денної та заочної форм навчання

Луцьк 2025

УДК 539.2 (07)
Ф 50

До друку
Голова вченої ради факультету транспорту
та механічної інженерії ________ І. МУРОВАНИЙ

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозиторій ЛНТУ
Директор бібліотеки _____________ Н. ПОЛІЩУК

Затверджено вченою радою факультету транспорту та механічної інженерії, протокол № ___ від «___»__________2025 р.

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри фізики та вищої математики, протокол № ___ від «___»__________2025 р.

Завідувач кафедри фізики та вищої математики ___________ Д. ЗАХАРЧУК

Укладачі: _______ Ю. КОВАЛЬ, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики та вищої математики ЛНТУ;
________ Д. ЗАХАРЧУК, кандидат фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри фізики та вищої математики ЛНТУ

Рецензент: _______ Л.В. Ящинський, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики та вищої математики ЛНТУ

Відповідальний за випуск:________ Д. ЗАХАРЧУК, кандидат фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри фізики та вищої математики ЛНТУ

Ф 50 **Фізика** [Текст]: Методичні вказівки до виконання КПІЗ для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання / уклад. Ю.В. Коваль, Д.А. Захарчук, – Луцьк: ЛНТУ, 2025. – 88 с.

В методичних вказівках наведено приклади розв’язання задач з фізики та задачі для самостійного розв’язування за темами, що охоплюють всі розділи курсу фізики. На початку кожного з розділів подано короткий перелік формул і законів, які стосуються виконання завдань з відповідної теми.
Методичне видання призначене для студентів інженерно-технічних спеціальностей денної та заочної форм навчання ЛНТУ.

ЗМІСТ

Передмова…...………………………………………………………… 4
Розділ 1. Механіка……...……………………………………………….. 6
1. Основні закони і формули………………………………………. 6
2. Приклади розв'язування задач……………………………………... 8
3. Задачі для самостійного розв'язування………………………………. 14
Розділ 2. Молекулярна фізика і термодинаміка……………...……... 18
1. Основні закони і формули………………………………………. 18
2. Приклади розв'язування задач……………………………………... 20
3. Задачі для самостійного розв'язування………………………………. 26
Розділ 3. Електростатика…..…………………………………………. 30
1. Основні закони і формули………………………………………. 30
2. Приклади розв'язування задач……………………………………... 31
3. Задачі для самостійного розв'язування………………………………. 34
Розділ 4. Закони постійного струму………………………………….. 38
1. Основні закони і формули………………………………………. 38
2. Приклади розв'язування задач……………………………………... 39
3. Задачі для самостійного розв'язування………………………………. 42
Розділ 5. Електромагнетизм…………………………………………….. 45
1. Основні закони і формули………………………………………. 45
2. Приклади розв'язування задач……………………………………... 46
3. Задачі для самостійного розв'язування………………………………. 48
Розділ 6. Коливання та хвилі……………………………………………. 52
1. Основні закони і формули………………………………………. 52
2. Приклади розв'язування задач……………………………………... 53
3. Задачі для самостійного розв'язування………………………………. 55
Розділ 7. Хвильова оптика та квантова природа випромінювання… 59
1. Основні закони і формули………………………………………. 59
2. Приклади розв'язування задач……………………………………... 60
3. Задачі для самостійного розв'язування………………………………. 64
Розділ 8. Атомна та ядерна фізика……………...…………………… 68
1. Основні закони і формули………………………………………. 68
2. Приклади розв'язування задач……………………………………... 69
3. Задачі для самостійного розв'язування………………………………. 76
Довідкові таблиці……………………………………………………….. 78
Список рекомендованої літератури…………………………………….. 87

ПЕРЕДМОВА

Комплексне практичне індивідуальне завдання (КПІЗ) з дисципліни "Фізика" виконується упродовж семестру. Виконання його є обов’язковою умовою успішного вивчення курсу та отримання позитивної оцінки.

Метою виконання КПІЗ є розвиток навичок самостійної роботи, систематизація знань, закріплення теоретичних знань та практичне застосування знань студента з навчального курсу.

Методичні вказівки згруповано за основними розділами загального курсу фізики, відповідно до діючої програми.

Вміння розв’язувати задачі є одним з головних критеріїв оволодіння дисципліною “Фізика”. Крім знання теорії, головним, що сприяє успіхові у виконанні завдань, є оволодіння спеціальними методами і прийомами, які наведені у прикладах розв’язування задач.

Такі завдання в системі освіти є однією з форм перевірки засвоєння теоретичних знань курсу фізики, а також набуття навичок їх практичного використання при розв’язуванні задач.

Сформовані задачі поділено на окремі розділи. На початку кожного з них подано короткий перелік формул і законів, які стосуються виконання завдань з відповідної теми. Ці формули дозволяють студенту скласти уявлення про обсяг теоретичного матеріалу, який необхідно опрацювати, і можуть слугувати формальним апаратом для розв'язування задач. До кожного розділу подано приклади виконання завдань.

В кінці методичних вказівок подано довідкові таблиці та список рекомендованої літератури, яку необхідно опрацювати для самостійного виконання завдань з відповідного розділу.

Розв’язуючи задачі, доцільно дотримуватись вимог щодо оформлення, а саме:

1. Номери задач (варіанти завдань) визначаються викладачем.
2. Завдання повинні виконуватися послідовно по пройдених темах.
3. Терміни представлення виконаних студентами задач оголошуються викладачем.
4. Задачі оформляються в письмовому вигляді на окремих листах.
5. Розв’язок кожної задачі необхідно починати з нової сторінки.
6. Вказавши на номер задачі, слід повністю, без скорочень, переписати умову задачі.
7. Розв’язок задачі записується у стандартному вигляді.
8. Всі фізичні величини потрібно виразити в системі СІ.
9. Виконати рисунок, схему, якщо це необхідно.
10. Сформулювати основні закони, записати формули, на яких базується розв’язок задачі. Обґрунтувати необхідність їх застосування для розв’язку даної задачі. Скласти повну систему рівнянь для розв’язку задачі.

11. Отримати остаточний вираз для шуканої величини в загальному вигляді. Перевірити розмірність.
12. Підставити числові дані і розрахувати шукану величину.
13. Проаналізувати отриманий результат.
14. Записати відповідь.
15. Кожну задачу потрібно захистити, тобто її розв'язок повністю пояснити викладачеві.
16. Оскільки виконувана робота містить також і графічну частину, то, крім наведених вище пунктів, особливу увагу слід приділити побудові у необхідному масштабі потрібних у задачі функціональних залежностей.

РОЗДІЛ 1. МЕХАНІКА

Основні закони і формули

Середня швидкість руху	$\upsilon_{cp} = \dfrac{\Delta S}{\Delta t}$
Миттєва швидкість	$\upsilon = \dfrac{dS}{dt}$
Середнє прискорення руху	$a_{cp} = \dfrac{\Delta \upsilon}{\Delta t}$
Миттєве прискорення	$a = \dfrac{d\upsilon}{dt}$
Рівняння рівноприскореного руху	$S=S_0+\upsilon_0 t+\dfrac{at^2}{2}$
Швидкість рівноприскореного руху	$\upsilon=\upsilon_0+at$
Тангенціальне прискорення	$a_\tau = \dfrac{d\upsilon}{dt}$
Нормальне прискорення	$a_n = \dfrac{\upsilon^2}{R}$
Повне прискорення	$a=\sqrt{a_\tau^2+a_n^2}$
Імрульс тіла	$\vec{p}=m\vec{\upsilon}$
Другий закон Ньютона	$a=\dfrac{F}{m}$; $\quad \vec{F}=\dfrac{d(m\vec{\upsilon})}{dt}$
Закон Всесвітнього тяжіння	$F=\gamma\dfrac{m_1 m_2}{R^2}$
Сила пружності	$F=-kx$
Кінетична енергія поступального руху	$W_\kappa = \dfrac{m\upsilon^2}{2}$
Потенціальна енергія тіла піднятого на висоту h	$W_n = mgh$
Потенціальна енергія стиснутої пружини	$W_n = \dfrac{kx^2}{2}$
Робота постійної сили	$A = FS\cos\alpha$
Робота непостійної сили	$A = \int_a^b F\cos\alpha\, dS$
Робота як зміна енергії тіла	$A = W_2 - W_1$

Середня потужність	$N_{cp} = \dfrac{\Delta A}{\Delta t}$
Миттєва потужність	$N = \dfrac{dA}{dt} = F\upsilon\cos\alpha$
Середня кутова швидкість	$\omega_{cp} = \dfrac{\Delta\varphi}{\Delta t}$
Миттєва кутова швидкість	$\omega = \dfrac{d\varphi}{dt}$
Миттєве кутове прискорення	$\varepsilon = \dfrac{d\omega}{dt}$
Період обертання	$T = \dfrac{2\pi}{\omega}$
Частота обертання	$\nu = \dfrac{\omega}{2\pi}$
Рівняння рівноприскореного обертання	$\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t + \dfrac{\varepsilon t^2}{2}$
Кутова швидкість рівноприскореного обертання	$\omega = \omega_0 + \varepsilon t$
Довжина дуги пройдена матеріальною точкою при русі по колу	$S = \varphi \cdot R$
Зв’язок лінійної і кутової швидкості	$\upsilon = \omega \cdot R$
Тангенціальне прискорення	$a_\tau = \varepsilon \cdot R$
Нормальне прискорення	$a_н = \omega^2 \cdot R$
Момент інерції матеріальної точки	$I = mR^2$
Момент інерції твердого тіла	$I = \sum_{i=1}^{n} m_i R_i^2$
Момент імпульсу відносно осі z	$L_z = I \cdot \omega$
Рівняння динаміки обертального руху тіла відносно нерухомої осі z	$M_z = \dfrac{dL_z}{dt} = I \cdot \varepsilon$
Теорема Штейнера	$I = I_0 + ma^2$
Кінетична енергія обертального руху	$W_к = \dfrac{I\omega^2}{2}$
Робота обертаючого моменту сил	$A = M \cdot \varphi$
Миттєва потужність при обертальному русі	$N = M \cdot \omega$

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Рух тіла задано рівнянням $x = 2t^3 + t^2 + t - 1$. Знайти залежність швидкості і прискорення від часу.

Дано: $x = 2t^3 + t^2 + t - 1$

Знайти: $a, \upsilon - ?$

Миттєву швидкість знаходимо, як похідну від координати по часу:

$$\upsilon = \frac{dx}{dt}, \ \upsilon = 6t^2 + 2t + 1 .$$

Миттєве прискорення – це перша похідна від швидкості по часу:

$$a = \frac{d\upsilon}{dt}, \ a = 12t + 2 .$$

Задача 2. Рівняння руху матеріальної точки вздовж осі має вигляд $x = A + Bt + Ct^3$, де $A = 2$ м, $B = 1$ м/с, $C =$ -0,5 м/с^3. Знайти координату x, швидкість υ_x і прискорення a точки в момент часу $t = 2$ с.

Дано: $x = A + Bt + Ct^3$; $A = 2$ м, $B = 1$ м/с, $C =$ -0,5 м/с^3.

Знайти: x, υ_x, $a - ?$

Координату x знайдемо, підставивши в рівняння руху числові значення коефіцієнтів *A, B, C* і часу t :

$$x = 2 + 1 \cdot 2 - 0{,}5 \cdot 8 = 0 .$$

Миттєва швидкість - це перша похідна від координати по часу:

$$\upsilon_x = \frac{dx}{dt} = B + 3Ct^2 .$$

Прискорення точки знайдемо, взявши першу похідну від швидкості по часу:

$$a = \frac{d\upsilon_x}{dt} = 6Ct.$$

В момент часу $t = 2$ с:

$$\upsilon = 1 - 3 \cdot 0{,}5 \cdot 2^2 = -5 \text{ м/с}.$$

$$a = 6 \cdot (-0{,}5) \cdot 2 = -6 \text{ м/с}^2.$$

Задача 3. З вертольота, що знаходиться на висоті 300 м, скинуто вантаж. Через який час вантаж досягне землі, якщо вертоліт: 1) нерухомий; 2) опускається зі швидкістю 5 м/с; 3)піднімається зі швидкістю 5 м/с?

Дано: $h = 300$ м; $\upsilon_x = 5$ м/с.

Знайти: $t_1, t_2, t_3 - ?$

1) Якщо вертоліт нерухомий, то відстань по вертикалі, яку проходить вантаж при вільному падінні:

$$h = \frac{gt^2}{2}.$$

Звідси час падіння вантажу на землю:

$$t_1 = \sqrt{\frac{2h_0}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 300}{9,8}} = 7,8 \text{ с.}$$

2) Якщо вертоліт опускається зі швидкістю υ_0, то і вантаж опускається разом з вертольотом зі швидкістю υ_0. Рівняння руху вантажу:

$$h = \upsilon_0 t + \frac{gt^2}{2}.$$

Коли вантаж досягне землі:

$$h = h_0, \; t = t_2$$

$$t_2^2 + \frac{2\upsilon_0}{g} t_2 - \frac{2h_0}{g} = 0;$$

$$t_2 = \frac{-\upsilon_0 \pm \sqrt{\upsilon_0^2 + 2gh_0}}{g};$$

Звідси:

$$t_2 = -0,5 \pm 7,8 \text{ с.}$$

Відкинемо $t_2 < 0$ і одержимо $t_2 = 7,8$ с.

3) Якщо вертоліт піднімається зі швидкістю υ_0, то і вантаж має таку ж початкову швидкість. У момент досягнення землі $h = h_0$, $t = t_3$.

Тоді:

$$h_0 = -\upsilon_0 t_3 + \frac{gt_3^2}{2}.$$

Звідси:

$$t_3 = \frac{\upsilon_0 \pm \sqrt{\upsilon_0^2 + 2gh_0}}{g} = \frac{5 \pm \sqrt{25 + 2 \cdot 9,8 \cdot 300}}{9,8} = \left(0,5 \pm 7,8\right) \text{ с.}$$

Відкинувши $t_3 < 0$, одержимо $t_3 = 8,3$ с.

Задача 4. Точка рухається по колу радіусом 20 см з постійним тангенціальним прискоренням a_τ. Знайти тангенціальне прискорення a_τ точки, якщо відомо, що до кінця п'ятого оберту після початку руху лінійна швидкість точки 79,2 см/с.

Дано: $R = 20$ см; $n = 5$; $\upsilon = 79{,}2$ см/с.

Знайти: $a_\tau - ?$

Лінійна швидкість υ при рівноприскореному русі по колу дорівнює ($a_\tau = const$):

$$\upsilon = a_\tau t.$$

Щоб знайти a_τ, потрібно знати час від початку обертання до кінця 5-го оберту. Його можна визначити, використавши співвідношення для кутового переміщення:

$$\Delta\varphi = \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}.$$

З урахуванням того, що початкова кутова швидкість дорівнює нулю:

$$\Delta\varphi = \frac{\varepsilon t^2}{2} = 2\pi n.$$

Тут ε - кутове прискорення, n - кількість обертів.

Отже:

$$t = \sqrt{\frac{4\pi n}{\varepsilon}}.$$

Кутове прискорення визначається виразом:

$$\varepsilon = \frac{a_\tau}{R}.$$

Тоді одержимо:

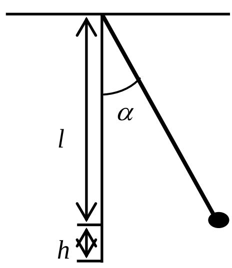
$$a_\tau = \frac{\upsilon}{t} = \frac{\upsilon}{\sqrt{\dfrac{4\pi nR}{a_\tau}}}.$$

Отже тангенціальне прискорення:

$$a_\tau = \frac{\upsilon^2}{4\pi nR}.$$

Обчислимо його значення:

$$a_\tau = 0{,}1 \text{ м/с}^2.$$



Задача 5. Для вимірювання швидкості куль інколи застосовують балістичний маятник, що складається з масивного вільно підвішеного на легкому стрижні довжиною l тіла масою M, у яке влучає куля, застряючи у ньому. Куля масою m відхиляє маятник від положення рівноваги на кут α. Знайти швидкість кулі, якщо $m = 20$ г, $M = 5$ кг, $l = 1$ м, $\alpha = 60^\circ$.

Дано: $m = 20$ г, $M = 5$ кг, $l = 1$ м, $\alpha = 60^\circ$

Знайти: $\upsilon - ?$

Застосуємо до системи маятник - куля закони збереження імпульсу та енергії. За законом збереження імпульсу для двох тіл, враховуючи, що удар маятника і кулі є непружним, можна знайти значення спільної швидкості маятника і кулі після того, як у маятник влучила куля:

$$u = \frac{m\upsilon}{m+M}.$$

Закон збереження енергії пов'язує висоту h, до якої піднімається маятник, із швидкістю u :

$$\left(M+m\right)gh = \frac{\left(M+m\right)u^2}{2};\; h = \frac{u^2}{2g}.$$

Враховуючи, що $h = 2l\,sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ швидкість кулі визначається за співвідношенням:

$$\upsilon = \frac{2\left(m+M\right)\sqrt{gl}\,sin\frac{\alpha}{2}}{m} \approx \frac{2M\sqrt{gl}\,sin\frac{\alpha}{2}}{m}.$$

Наближена рівність справедлива, оскільки $m \ll M$. Виконавши обчислення, отримаємо:

$$\upsilon = 782{,}6\ \text{м}.$$

Задача 6. Між двома тілами масами m_1 і m_2 відбувається непружний удар, причому друге тіло до удару перебувало у спокої. Знайти частку кінетичної енергії, що перейде у тепло.

Дано: $m_1,\ m_2,\ \upsilon_2 = 0$

Знайти: $\frac{\Delta W}{W_1} - ?$

Після удару обидва тіла рухаються як єдине ціле зі спільною швидкістю u , яка дорівнює

$$u = \frac{m_1\upsilon_1}{m_1+m_2}.$$

Їхня кінетична енергія буде:

$$W_2 = \frac{\left(m_1+m_2\right)u^2}{2} = \frac{m_1^2\upsilon_1^2}{2\left(m_1+m_2\right)}.$$

До удару кінетичну енергію мало тільки перше тіло:

$$W_1 = \frac{m_1\upsilon_1^2}{2}.$$

Різниця цих енергій дорівнює кількості тепла, яке виділиться в результаті непружного удару тіл. Поділивши цю різницю на початкову кінетичну енергію знайдемо шукану частку кінетичної енергії, що перетворилась у тепло:

$$\eta = \frac{W_1 - W_2}{W_1} = 1 - \frac{W_2}{W_1} = \frac{m_1}{m_1 + m_2}.$$

Задача 7. Із пружинного пістолета було зроблено постріл вертикально вгору. Визначити висоту h, на яку підніметься куля масою 20 г, якщо пружина жорсткістю 196 Н/м була стиснута перед пострілом на 10 см. Масою пружини знехтувати.

Дано: $m = 20$ г, $k = 196$ Н/м, $x = 10$ см.

Знайти: $h - ?$

Система куля-Земля (разом з пістолетом) є замкненою системою, в якій діють консервативні сили - сили пружності і сили тяжіння. Тому для розв'язування задачі можна застосовувати закон збереження механічної енергії. Згідно з цим законом повна механічна енергія E_1 системи в початковому стані (в даному випадку перед пострілом) дорівнює повній енергії E_2 в кінцевому стані (коли куля піднялася на висоту h), тобто:

$$E_1 = E_2 \text{, або } T_1 + \Pi_1 = T_2 + \Pi_2,$$

де T_1 і T_2 - кінетичні енергії системи в початковому і кінцевому стані; Π_1 і Π_2 - потенціальні енергії у тих же станах. Оскільки кінетична енергія кулі в початковому і кінцевому станах дорівнює нулю, то дана рівність буде мати вигляд:

$$\Pi_1 = \Pi_2.$$

Приймемо потенціальну енергію кулі в полі тяжіння рівною нулю на рівні розміщення пістолета. Тоді потенціальна енергія системи в початковому стані дорівнює потенціальній енергії стисненої пружини:

$$\Pi_1 = \frac{kx^2}{2},$$

а в кінцевому стані - потенціальній енергії кулі на висоті h:

$$\Pi_2 = mgh.$$

Підставивши наведені вирази для енергій у формулу для їх рівності одержимо:

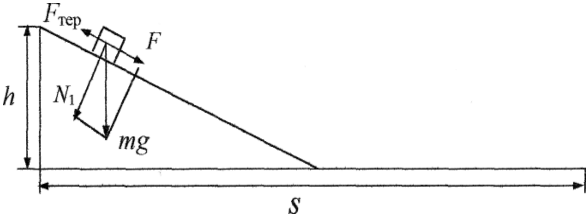
$$\frac{kx^2}{2} = mgh \text{, а отже } h = \frac{kx^2}{2mg}.$$

Виконавши обчислення, отримаємо $h = 5\,м$.

Задача 8. Тіло зісковзує з крижаної гори висотою h і зупиняється на крижаному полі на відстані s (у горизонтальному напрямку) від вершини гори (див. рисунок). Визначити коефіцієнт тертя k.

Дано: *h, s*.

Знайти: $k - ?$



У початковому положенні тіло має лише потенціальну енергію $E_1 = W_n = mgh$. У кінцевому положенні в момент зупинки повна енергія тіла $E_2 = 0$. Зміна енергії тіла відбулася за рахунок роботи зовнішніх сил. У цьому випадку зовнішньою силою є сила тертя. На відрізку шляху вздовж похилої площини її величина дорівнює:

$$F_{тер} = kN_1 = kmg\cos\alpha .$$

Тут сила тертя виконує роботу:

$$A_1 = -F_{тер}l = -F_{тер}h / \sin\alpha ,$$

ця робота від'ємна, бо сила тертя напрямлена протилежно напрямку руху тіла.

На горизонтальному відрізку сила тертя рівна:

$$F'_{тер} = kmg ,$$

а її робота:

$$A_2 = -F'_{тер}\left(s - l\right) = -kmg\left(s - hctg\alpha\right).$$

Зміна енергії

$$E_2 - E_1 = -mgh$$

відбулась за рахунок виконання роботи силою тертя:

$$-mgh = -hkmgctg - kmg\left(s - hctg\alpha\right).$$

Звідси: $$k = \frac{h}{s}.$$

Задача 9. Нехтуючи тертям, визначити, яку роботу треба виконати, щоб довести маховик, масу якого 0,2 т наближено можна вважати рівномірно розподіленою по його обводу діаметром 1,2 м, до рівномірного обертання з частотою 100 об/хв.

Дано: $M = 0{,}2$ т, $d = 1{,}2$ м, $\nu = 100$ об/хв.

Знайти: $A - ?$

Шукану роботу можна обчислити як зміну кінетичної енергії маховика W_k. Спочатку кінетична енергія $W_{k1} = 0$, а потім досягає значення:

$$W_{k2} = \frac{I\omega^2}{2},$$

де I - момент інерції маховика відносно осі обертання, а ω - кутова швидкість маховика.

Кутова швидкість:

$$\omega = 2\pi\nu .$$

Отже:

$$A = \Delta W = W_{k2} = 2I\pi^2\nu^2 .$$

Момент інерції маховика можна обчислити за формулою:

$$I = mr^2 = \frac{md^2}{4} .$$

Підставивши цей вираз у формулу для роботи, знайдемо:

$$A = \frac{1}{2}m\pi^2\nu^2 ; \; A = 40 \text{ Дж.}$$

Задачі для самостійного розв’язування

1.1. Побудувати графік залежності від часу кінетичної і потенційної енергії каменя масою 1 кг, кинутого вертикально вгору з початковою швидкістю 9,8 м/с, для $0 < t < 2$ с через кожні 0,2 с. Опір повітря не враховувати.

1.2. Дві кулі підвішені на паралельних нитках однакової довжини так, що вони стикаються. Маса першої кулі 0.2 кг, маса другої 100 г. Першу кулю відхиляють так, що її центр ваги піднімається на висоту h = 4.5 см і відпускають. На яку висоту піднімуться кулі після зіткнення, якщо: 1) удар пружний; 2) удар непружний. Побудувати графік залежності висоти піднімання другої кулі після зіткнення у двох випадках в залежності від висоти підйому центра мас першої кулі до зіткнення для $1 < h < 10$ см.

1.3. До шнура підвішена гиря. Гирю відвели убік так, що шнур прийняв горизонтальне положення, і відпустили. Якою є сила натягу шнура в момент, коли гиря проходить положення рівноваги? Який кут з вертикаллю складає шнур у момент, коли сила натягу шнура дорівнює вазі гирі? Побудувати графік залежності сили натягу шнура від кута, що складає він з вертикаллю.

1.4. Довжина тонкого прямого стержня 60 см, маса 100 г. Визначити момент інерції стержня відносно осі, яка перпендикулярна до його довжини і проходить через точку стержня, віддалену на 20 см від одного з його кінців. Побудувати графік залежності величини моменту інерції стержня від відстані для інтервалу: $0 < l < 60$ см.

1.5. Крижина площею поперечного перерізу 1 м^2 і товщиною 0.4 м плаває у воді. Яку роботу треба виконати, щоб цілком занурити крижину у воду? Густина води 1000 кг/м^3, льоду - 900 кг/м^3. Побудувати графік залежності величини роботи, яку треба виконати, щоб цілком занурити крижину у воду, від товщини крижини.

1.6. Хлопчик котить обруч по горизонтальній дорозі зі швидкістю 7.2 км/год. На яку відстань s може вкотитися обруч на гірку за рахунок його кінетичної енергії? Нахил гірки дорівнює 10 м на кожні 100 м шляху. Побудувати графік залежності величини відстані l, на яку може вкотитися обруч на гірку, від висоти h для інтервалу: $1 < h < 50$ м.

1.7. Куля масою 1 кг, що котиться по горизонтальній поверхні без тертя і ковзання, вдаряється в стінку і відкочується від неї. Швидкість кулі до удару в стінку 10 см/с, після удару 8 см/с. Знайти кількість тепла, що виділилося при ударі. Побудувати графік залежності величини кількості тепла, що виділилося при ударі, від різниці швидкостей до і після удару в інтервалі: $0 < \Delta\upsilon < 10$ см/с.

1.8. На барабан радіусом 20 см, момент інерції якого дорівнює $0.1 кг \cdot м^2$, намотаний шнур, до якого прив'язаний вантаж масою 0.5 кг. До початку обертання барабана висота вантажу над підлогою дорівнювала 1м. Через скільки часу вантаж опуститься до підлоги? Побудувати графік залежності величини цього часу від початкової висоти вантажу над підлогою для $0,5 < h < 5$ м. Тертям знехтувати.

1.9. На барабан радіусом 20 см, момент інерції якого дорівнює 0.1 кг$\cdot$м^2, намотаний шнур, до якого прив'язаний вантаж масою 0.5 кг. До початку обертання барабана висота вантажу над підлогою дорівнювала 1 м. Знайти кінетичну енергію вантажу в момент удару об підлогу. Побудувати графік залежності величини цієї кінетичної енергії від початкової висоти вантажу над підлогою для $0,5 < h < 5$ м. Тертям знехтувати.

1.10. Крижина площею поперечного перерізу 1м^2 і товщиною 0.4 м плаває у воді. Яку роботу треба виконати, щоб повністю занурити крижину у воду? Густина води 1000 кг/м^3, льоду - 900 кг/м^3. Побудувати графік залежності величини роботи, яку треба виконати, щоб цілком занурити крижину у воду, від площі поперечного перерізу крижини в інтервалі $1 < s < 10$ м^2.

1.11. Залежність пройденого тілом шляху s від часу t дається рівнянням $s=At-Bt^2+Ct^3$, де A= 2м/с, B=3 м/с^2 і C=4 м/с^3. Побудувати графік залежності швидкості від часу для $0 < t < 3$ с через 0,5 с.

1.12. Залежність пройденого тілом шляху s від часу t дається рівнянням $s=A-Bt+Ct^2$, де A= 2м/с, B=3 м/с^2 і C=4 м/с^3. Побудувати графік залежності шляху від часу для $0 < t < 5$ с через 0,5 с.

1.13. Залежність пройденого тілом шляху s від часу t дається рівнянням $s=A-Bt+Ct^2$, де A=6 м, B=3 м/с і C=2 м/с^2. Побудувати графік залежності прискорення від часу для $0 < t < 5$ с через 1 с.

1.14. Залежність пройденого тілом шляху s від часу t дається рівнянням $s=At-Bt^2+Ct^3$, де A=6 м, B=3 м/с і C=2 м/с^2. Побудувати графік залежності швидкості від часу для $0 < t < 5$ с через 1 с.

1.15. Вісь із двома дисками, розташованими на відстані 0.5 м один від одного, обертається з кутовою швидкістю, що відповідає частоті 1600 об/хв. Куля, що летить уздовж осі, пробиває обидва диски; при цьому отвір від кулі в другому диску зміщено щодо отвору в першому диску на кут φ=12°. Знайти швидкість кулі. Побудувати графік залежності кута φ від швидкості руху кулі для $0{,}1\upsilon < \upsilon < 2\upsilon$.

1.16. Точка рухається колом радіусом 10 см з постійним тангенціальним прискоренням. Знайти тангенціальне прискорення точки, якщо відомо, що до кінця п'ятого оберту після початку руху швидкість точки стала 79.2 см/с. Побудувати графік залежності величини швидкості матеріальної точки від тангенціального прискорення для $0{,}1a_\tau < a_\tau < 2a_\tau$.

1.17. Побудувати графік залежності висоти h від часу t для тіла, кинутого вертикально вгору з початковою швидкістю 9,8 м/с. Графік побудувати для інтервалу часу від 0 до 2 с, тобто для $0 < t < 2$ с, через кожні 0,2 с. Опір повітря не враховувати.

1.18. Тіло масою 0.5 кг рухається так, що залежність пройденого тілом шляху від часу руху дається рівнянням $s = A\sin\omega t$, де A= 5см і $\omega = \pi$ рад/с. Знайти силу, що діє на тіло через 1/6 с після початку руху. Побудувати графік залежності величини сили, що діє на тіло, від часу для $0 < t < 4$ с.

1.19. На столі стоїть візок масою 4 кг. До візка прив'язали один кінець шнура, перекинутого через блок. З яким прискоренням буде рухатися візок, якщо до іншого кінця шнура прив'язати гирю масою 1 кг? Побудувати графік залежності величини прискорення візка від маси гирі для $0{,}5 < m < 6$ кг.

1.20. Вагон масою 20 т рухається з постійним від’ємним прискоренням, чисельно рівним 0,3 м/с^2. Початкова швидкість вагона дорівнює 54 км/год. 1) Яка сила гальмування діє на вагон? 2) Через скільки часу вагон зупиниться? 3) Яку відстань вагон пройде до зупинки? Побудувати графік залежності відстані, яку вагон пройде до зупинки, від маси вагона для $0{,}1m < m < 1{,}5m$.

1.21. Побудувати графік залежності від часу кінетичної і потенційної енергії каменя масою 1 кг, кинутого вертикально вгору з початковою швидкістю 9,8 м/с, для $0 < t < 2$ с через кожні 0,2 с. Опір повітря не враховувати.

1.22. Дві кулі підвішені на паралельних нитках однакової довжини так, що вони стикаються. Маса першої кулі 0.2 кг, маса другої 100 г. Першу кулю відхиляють так, що її центр ваги піднімається на висоту h = 4.5 см і відпускають. На яку висоту піднімуться кулі після зіткнення, якщо: 1) удар пружний; 2) удар непружний. Побудувати графік залежності висоти піднімання другої кулі після зіткнення у двох випадках в залежності від висоти підйому центра мас першої кулі до зіткнення для $1 < h < 10$ см.

1.23. До шнура підвішена гиря. Гирю відвели убік так, що шнур прийняв горизонтальне положення, і відпустили. Якою є сила натягу шнура в момент, коли гиря проходить положення рівноваги? Який кут з вертикаллю складає шнур у момент, коли сила натягу шнура дорівнює вазі гирі?

Побудувати графік залежності сили натягу шнура від кута, що складає він з вертикаллю.

1.24. Довжина тонкого прямого стержня 60 см, маса 100 г. Визначити момент інерції стержня відносно осі, яка перпендикулярна до його довжини і проходить через точку стержня, віддалену на 20 см від одного з його кінців. Побудувати графік залежності величини моменту інерції стержня від відстані для інтервалу: $0 < l < 60$ см.

1.25. Крижина площею поперечного перерізу 1 м^2 і товщиною 0.4 м плаває у воді. Яку роботу треба виконати, щоб цілком занурити крижину у воду? Густина води 1000 кг/м^3, льоду - 900 кг/м^3. Побудувати графік залежності величини роботи, яку треба виконати, щоб цілком занурити крижину у воду, від товщини крижини.

1.26. Хлопчик котить обруч по горизонтальній дорозі зі швидкістю 7.2 км/год. На яку відстань s може вкотитися обруч на гірку за рахунок його кінетичної енергії? Нахил гірки дорівнює 10 м на кожні 100 м шляху. Побудувати графік залежності величини відстані l, на яку може вкотитися обруч на гірку, від висоти h для інтервалу: $1 < h < 50$ м.

1.27. Куля масою 1 кг, що котиться по горизонтальній поверхні без тертя і ковзання, вдаряється в стінку і відкочується від неї. Швидкість кулі до удару в стінку 10 см/с, після удару 8 см/с. Знайти кількість тепла, що виділилося при ударі. Побудувати графік залежності величини кількості тепла, що виділилося при ударі, від різниці швидкостей до і після удару в інтервалі: $0 < \Delta\upsilon < 10$ см/с.

1.28. На барабан радіусом 20 см, момент інерції якого дорівнює $0.1 \text{кг} \cdot \text{м}^2$, намотаний шнур, до якого прив'язаний вантаж масою 0.5 кг. До початку обертання барабана висота вантажу над підлогою дорівнювала 1м. Через скільки часу вантаж опуститься до підлоги? Побудувати графік залежності величини цього часу від початкової висоти вантажу над підлогою для $0,5 < h < 5$ м. Тертям знехтувати.

1.29. На барабан радіусом 20 см, момент інерції якого дорівнює $0.1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, намотаний шнур, до якого прив'язаний вантаж масою 0.5 кг. До початку обертання барабана висота вантажу над підлогою дорівнювала 1 м. Знайти кінетичну енергію вантажу в момент удару об підлогу. Побудувати графік залежності величини цієї кінетичної енергії від початкової висоти вантажу над підлогою для $0,5 < h < 5$ м. Тертям знехтувати.

1.30. Крижина площею поперечного перерізу 1м^2 і товщиною 0.4 м плаває у воді. Яку роботу треба виконати, щоб повністю занурити крижину у воду? Густина води 1000 кг/м^3, льоду - 900 кг/м^3. Побудувати графік залежності величини роботи, яку треба виконати, щоб цілком занурити крижину у воду, від площі поперечного перерізу крижини в інтервалі $1 < s < 10$ м^2.

РОЗДІЛ 2. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА

Основні закони і формули

Закон Клапейрона	$\frac{pV}{T} = const\ (m = const)$
Закон Бойля-Маріотта	$pV = const\ (T = const, m = const)$
Закон Гей-Люссака	$\frac{V}{T} = const\ (p = const, m = const)$
Закон Шарля	$\frac{p}{T} = const\ (V = const, m = const)$
Рівняння Менделєєва - Клапейрона	$pV = \frac{m}{M}RT$
Рівняння стану для суміші газів за законом Дальтона	$pV = \left(\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \ldots + \frac{m_n}{M_n}\right)RT$
Основне рівняння кінетичної теорії газів для тиску	$p = \frac{1}{3}nm_0\bar{\upsilon}_{кв}^{\ 2} = \frac{2}{3}n\bar{E} = nkT$
Перше начало термодинаміки	$\Delta Q = \Delta U + \Delta A$
Робота газу проти сил зовнішнього тиску	$A = \int_{V_1}^{V_2} pdV$, $A = p(V_2 - V_1)$
Зміна внутрішньої енергії при ізохорному процесі	$dU = \frac{m}{M}C_V dT$
Зміна кількості теплоти при ізобарному процесі	$\delta Q = \frac{m}{M}C_p dT$
Рівняння Майєра	$R = C_p - C_V$
Робота і кількість теплоти в ізотермічному процесі	$Q = A = \frac{m}{M}RT\ ln\frac{V_2}{V_1}$
Рівняння Пуассона	$pV^{\gamma} = const$, $pT^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = const$ $VT^{\frac{1}{\gamma-1}} = const$, $TV^{\gamma-1} = const$
Робота при адіабатному процесі	$A = \frac{p_1V_1^{\gamma}}{1-\gamma}\left(V_2^{1-\gamma} - V_1^{1-\gamma}\right)$, $A = \frac{RT_1}{\gamma-1}\frac{m}{M}\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)$

Внутрішня енергія ідеального газу	$U = \frac{i}{2}\frac{m}{M}RT$
Повна енергія руху молекули	$\bar{E} = \frac{i}{2}kT$
Найбільш імовірна швидкість	$\upsilon_i = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}$
Середня квадратична швидкість	$\bar{\upsilon}_{кв} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$
Середня арифметична швидкість	$\bar{\upsilon}_{ар} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}$
Закон розподілу молекул за швидкостями (закон Максвела)	$dn = n_0 4\pi\left(\frac{m_0}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{m_0\upsilon^2}{2kT}}\upsilon^2 d\upsilon$
Барометрична формула	$p = p_0 e^{-\frac{\mu g}{RT}(h-h_0)} = p_0 e^{-\frac{m_0 g}{kT}(h-h_0)}$
Розподіл Больцмана для концентра-ції молекул в потенціальному полі	$n = n_0 e^{-\frac{m_0 g}{kT}(h-h_0)} = n_0 e^{-\frac{\Delta W_n}{kT}}$
Середнє число зіткнень однієї молекули за одиницю часу в одиниці об’єму	$\bar{z} = \sqrt{2}\pi d^2 n\bar{u}$
Середнє число зіткнень молекул за одиницю часу в одиниці об’єму	$\bar{Z} = \frac{1}{\sqrt{2}}\pi d^2 n^2\bar{u}$
Середня довжина вільного пробігу молекул газу	$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}$
Закон А.Фіка для дифузії	$dM = -D\frac{d\rho}{dx}dSdt$
Коефіцієнт дифузії	$D = \frac{1}{3}\bar{u}\bar{\lambda}$

Закон Ж.Фур’є для теплопровідності	$dQ = -K\dfrac{dT}{dx}dSdt$
Коефіцієнт теплопровідності	$K = \dfrac{1}{3}\bar{u}\bar{\lambda}c_V\rho$
Закон Ньютона для сили внутрішнього тертя	$dF = -\eta\dfrac{d\upsilon}{dx}dS$
Коефіцієнт внутрішнього тертя	$\eta = \dfrac{1}{3}\bar{u}\bar{\lambda}\rho$

Приклади розв’язування задач

Задача 1. В посудині об’ємом 3 м^3 знаходиться суміш 7 кг азоту і 2 кг водню при температурі 27ºC. Визначити тиск і молярну масу суміші газів.

Дано: $V = 3$ м^3; m_1 =7 кг; $M_1 = 28\cdot10^{-3}$ кг/моль; m_2 =2 кг; $M_2 = 2\cdot10^{-3}$ кг/моль; T =300 К.

Знайти: $p, M - ?$

Запишемо рівняння Менделєєва – Клапейрона для азоту і водню:

$$p_1V = \frac{m_1}{M_1}RT\ , \tag{1}$$

$$p_2V = \frac{m_2}{M_2}RT\ , \tag{2}$$

де p_1 - парціальний тиск азоту, m_1 - маса азоту, M_1 - його молярна маса, V - об’єм посудини, T - температура газу, $R = 8,31\dfrac{\text{Дж}}{\text{моль}\cdot\text{К}}$, p_2 - парціальний тиск водню, m_2 - маса водню, M_2 - його молярна маса.

За законом Дальтона, тиск суміші рівний сумі парціальних тисків газів, що входять до складу суміші:

$$p = p_1 + p_2\ . \tag{3}$$

Під парціальним тиском p_1 і p_2 розуміють той тиск, який чинив би газ, якби він тільки один знаходився в посудині.

З рівнянь (1) і (2) знайдемо p_1 та p_2 і підставимо в рівняння (3)

$$p = \frac{m_1RT}{M_1V} + \frac{m_2RT}{M_2V} = \left(\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2}\right)\frac{RT}{V}\ . \tag{4}$$

Молярну масу суміші газів знайдемо за формулою:

$$M = \frac{m_1 + m_2}{\nu_1 + \nu_2}, \qquad (5)$$

де ν_1 і ν_2 - число молів азоту і водню відповідно. Число молів газу знайдемо за формулами:

$$\nu_1 = \frac{m_1}{M_2}, \qquad (6)$$

$$\nu_2 = \frac{m_2}{M_2}. \qquad (7)$$

Підставляючи (6) і (7) в (5), знаходимо:

$$M = \frac{m_1 + m_2}{\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2}}, \qquad (8)$$

Підставляючи дані в (3) і (4), знайдемо тиск суміші:

$$p = \left(\frac{7}{28 \cdot 10^{-3}} + \frac{2}{2 \cdot 10^{-3}}\right) \cdot \frac{8{,}31 \cdot 300}{3} = 1{,}04 \cdot 10^{6} \text{ Па.}$$

$$M = \frac{7+2}{\left(\frac{7}{28 \cdot 10^{-3}} + \frac{2}{2 \cdot 10^{-3}}\right)} = 7{,}2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль.}$$

Задача 2. Визначити середні кінетичні енергії поступального і обертального руху молекул, що містяться в 4 кг кисню при температурі 200 К.

Дано: m =4 кг; $M = 32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; T =200 К.

Знайти: $< E_{пост} >, < E_{об} > - ?$

Для двохатомного ідеального газу, яким є кисень, число ступенів вільності молекули $i = 5$. В середньому на один ступінь вільності припадає енергія:

$$< \varepsilon_i > = \frac{1}{2} kT,$$

де k - стала Больцмана, T - термодинамічна температура.

З п’яти ступенів вільності поступальному руху відповідає три ($i = 3$), а обертальному два ($i = 2$). Тоді енергія одної молекули:

$$< \varepsilon_{пост} > = \frac{3}{2} kT, \; < \varepsilon_{об} > = kT.$$

Число молекул кисню:

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

де m - маса кисню, M - його молярна маса, ν - кількість молів, N_A - стала Авогадро.

Тоді середня кінетична енергія поступального руху молекул кисню:

$$<E_{пост}> = \frac{m}{M} N_A \cdot \frac{3}{2} kT = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT \ , \qquad (1)$$

де $R = kN_A$ - молярна газова стала.

Середня кінетична енергія обертального руху молекул кисню:

$$<E_{об}> = \frac{m}{M} RT \ . \qquad (2)$$

Підставляючи числові значення у формули (1) і (2), отримаємо:

$$<E_{пост}> = \frac{3{,}4 \cdot 8{,}31 \cdot 200}{2{,}32 \cdot 10^{-3}} = 3{,}12 \cdot 10^{5} \text{ Дж.}$$

$$<E_{об}> = \frac{4 \cdot 8{,}32 \cdot 200}{32 \cdot 10^{-3}} = 2{,}08 \cdot 10^{5} \text{ Дж.}$$

Задача 3. Визначити середню довжину вільного пробігу молекул і число співударів за 1 с, що відбуваються між всіма молекулами водню, який міститься в посудині об’ємом 1 л при температурі 27ºС і тиску 10^4 Па.

Дано: $V = 1\text{л} = 10^{-3}\text{м}^3$; $M = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; T =300 К; $P = 10^4$ Па; $d = 2{,}3 \cdot 10^{-10}$ м;

Знайти: $<\lambda>, Z - \ ?$

Середня довжина вільного пробігу молекул:

$$<\lambda> = \frac{1}{\sqrt{2}\pi \cdot d^2 n} \ , \qquad (1)$$

де d - ефективний діаметр молекули, n - концентрація молекул.

Концентрацію n молекул визначаємо з основного рівняння молекулярно - кінетичної теорії:

$$p = nkT \ ,$$

звідки:

$$n = \frac{p}{kT} \ , \qquad (2)$$

де k - стала Больцмана.

Підставляючи (2) в (1) отримаємо:

$$<\lambda> = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi \cdot d^2 p} \ . \qquad (3)$$

Число співударів Z, що відбуваються між всіма молекулами за 1 с, знаходимо із співвідношення:

$$Z = \frac{<z>N}{2}, \tag{4}$$

де N - число молекул водню в посудині об'ємом $V = 10^{-3}\,\text{м}^3$; $<z>$ - середнє число співударів однієї молекули за 1 с.

Кількість молекул в посудині:

$$N = nV. \tag{5}$$

Середнє число зіткнень молекули за 1 с:

$$<z> = \frac{<\upsilon>}{<\lambda>}, \tag{6}$$

де $<\upsilon>$ - середня арифметична швидкість молекули:

$$<\upsilon> = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \cdot M}}. \tag{7}$$

Підставляючи в (4) вирази (5), (6), (7), знаходимо:

$$Z = \frac{1}{2}\frac{\sqrt{\frac{8RT}{\pi \cdot M}}\sqrt{2}\pi \cdot d^2 p \cdot}{kT} \cdot \frac{pV}{kT} = \frac{2\pi \cdot d^2 p^2 V}{(kT)^2}\sqrt{\frac{RT}{\pi \cdot M}}.$$

$$Z = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot (2{,}3 \cdot 10^{-10}\,\text{м})^2 \cdot (10^4\,\text{Па})^2 \cdot 10^{-3}\,\text{м}^3}{(1{,}38 \cdot 10^{-23}\,\text{Дж/К} \cdot 300\text{К})^2} \times$$

$$\times \frac{8{,}31\text{Дж/мольК} \cdot 300\text{К}}{3{,}14 \cdot 2 \cdot 10^{-3}\,\text{кг/моль}} = 1{,}21 \cdot 10^{30}\,\text{с}^{-1}.$$

$$<\lambda> = \frac{1{,}38 \cdot 10^{-23}\,\text{Дж/К} \cdot 300\text{К}}{2 \cdot 3{,}14 \cdot (2{,}3 \cdot 10^{-10}\,\text{м})^2 \cdot 10^4\,\text{Па}} = 1{,}76 \cdot 10^{-6}\,\text{м}.$$

Задача 4. Визначити коефіцієнт дифузії і внутрішнього тертя гелію, температура якого 200 К і тиск 10^4 Па.

Дано: $M = 4 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; $T = 200$ К; $p = 10^4$ Па; $d = 1{,}9 \cdot 10^{-10}$ м

Знайти: $D, \eta - ?$

Коефіцієнт дифузії:

$$D = \frac{1}{3}<\upsilon><\lambda>, \tag{1}$$

де $<\lambda>$ - середня довжина вільного пробігу молекул; $<\upsilon>$ - середня арифметична швидкість молекул, яка рівні відповідно:

$$<\upsilon> = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \cdot M}}, \tag{2}$$

$$< \lambda >= \frac{kT}{\sqrt{2}\pi \cdot d^2 p} . \qquad (3)$$

Підставляючи (2) і (3) в (1), отримаємо:

$$D = \frac{1}{3}\sqrt{\frac{8RT}{\pi \cdot M}} \frac{kT}{\sqrt{2}\pi \cdot d^2 p} = \frac{2kT}{3\pi \cdot d^2 p}\sqrt{\frac{RT}{\pi \cdot M}} . \qquad (4)$$

Коефіцієнт внутрішнього тертя:

$$\eta = \frac{1}{3} < \upsilon >< \lambda > \rho , \qquad (5)$$

де ρ - густина газу при температурі 200 К і тиску 10^4 Па.

Для знаходження ρ скористаємось рівнянням стану ідеального газу:

$$PV = \frac{m}{M} RT . \qquad (6)$$

Враховуючи, що $\rho = \frac{m}{V}$, отримаємо:

$$\rho = \frac{PM}{RT} . \qquad (7)$$

Коефіцієнт внутрішнього тертя газу через коефіцієнт дифузії виражається співвідношенням:

$$\eta = D\rho = \frac{DPM}{RT} . \qquad (8)$$

Підставляючи числові значення в (4) і (8), отримаємо:

$$D = \frac{2 \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23} \text{Дж / К} \cdot 200\text{К}}{3 \cdot 3{,}14(1{,}9 \cdot 10^{-10}\text{м})^2 \cdot 10^4 \text{Па}} \sqrt{\frac{8{,}31\text{Дж / моль} \cdot \text{К} \cdot 200\text{К}}{3{,}14 \cdot 4 \cdot 10^{-3}\text{кг / моль}}} =$$

$$= 5{,}9 \cdot 10^4 \text{м}^2 / \text{с}$$

$$\eta = 5{,}9 \cdot 10^4 \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \frac{10^4 \text{Па} \cdot 4 \cdot 10^{-3}\text{кг / моль}}{8{,}31\text{Дж / моль.К} \cdot 200\text{К}} = 1{,}44 \cdot 10^5 \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}} .$$

Задача 5. Об’єм аргону, що знаходиться під тиском 80 кПа, збільшився від 1 л до 2 л. Як зміниться внутрішня енергія газу, якщо розширення проводилось: а) ізобарно; б) адіабатно.

Дано: $V_1 = 1\text{л} = 10^{-3}\text{м}^3$; $V_2 = 2\text{л} = 2 \cdot 10^{-3}\text{м}^3$; $p = 0{,}8 \cdot 10^5 \text{Па}$; $M = 40 \cdot 10^{-3}$ кг/моль

Знайти: $\Delta U - ?$

Використаємо перший закон термо динаміки. Згідно цього закону кількість теплоти, передана системі, витрачається на збільшення внутрішньої енергії ΔU і на виконання зовнішньої механічної роботи A:

$$Q = \Delta U + A, \qquad (1)$$

де:

$$\Delta U = \frac{m}{M} C_V \Delta T \ . \qquad (2)$$

Тут m - маса газу, C_V - молярна ізохорна теплоємність, яка рівна:

$$C_V = \frac{i}{2} R \, . \qquad (3)$$

Тут i - число ступенів вільності. Тоді вираз (2) набуде вигляду:

$$\Delta U = \frac{m}{M} \frac{i}{2} R \Delta T \ . \qquad (4)$$

Запишемо рівняння Клапейрона-Менделеєва для початкового і кінцевого станів газу при ізобарному процесі:

$$pV_1 = \frac{m}{M} RT_1 \quad \text{та} \quad pV_2 = \frac{m}{M} RT_2 \, ,$$

звідки

$$p(V_2 - V_1) = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1) \, . \qquad (5)$$

Підставивши (5) в (4), отримаємо:

$$\Delta U = \frac{i}{2} P(V_2 - V_1) \ . \qquad (6)$$

При адіабатному розширенні газу теплообмін з зовнішнім середовищем відсутній, тому $Q = 0$. Рівняння (1) запишемо у вигляді:

$$\Delta U - A = 0 \, , \qquad (7)$$

або

$$A = -\Delta U \ . \qquad (8)$$

Знак “мінус” перед ΔU означає, що робота розширення газу може бути виконана лише за рахунок зменшення внутрішньої енергії газу.

Робота, що здійснюється газом при адіабатичному процесі:

$$A = \frac{P_1 V_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right] , \qquad (9)$$

де $\gamma = \dfrac{C_0}{C_V} = \dfrac{i+2}{i}$ - показник адіабати. Для одноатомного газу аргону 3. Тому $\gamma = \dfrac{3+2}{3} = 1{,}67$.

Знайдемо зміну внутрішньої енергії в адіабатичному процесі для аргону, враховуючи формули (8) і (9):

$$\Delta U = \frac{P_1 V_1}{(\gamma - 1)} \left[\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} - 1 \right] . \qquad (10)$$

Підставляючи числові значення в (6) і (10), отримаємо:

а) при ізотермічному розширенні:

$$\Delta U = \frac{3}{2}\cdot 0{,}8\cdot 10^5\,\text{Па}\cdot(2\cdot 10^{-3}\,\text{м}^3 - 10^{-3}\,\text{м}^3) = 120\ \text{Дж}\,.$$

б) при адіабатному розширенні:

$$\Delta U = \frac{0{,}8\cdot 10^5\,\text{Па}\cdot 10^{-3}\,\text{м}^3}{(1{,}67-1)}\left[\left(\frac{10^{-3}\,\text{м}^3}{2\cdot 10^{-3}\,\text{м}^3}\right)^{1{,}67-1} - 1\right] = -44{,}6\ \text{Дж}\,.$$

Задачі для самостійного розв'язування

2.1. Молекула азоту при нормальних умовах рухається зі швидкістю 454 м/с. Визначити імпульс молекули. Побудувати графік залежності величини імпульсу молекули від температури в інтервалі $200 < T < 1000$ К.

2.2. Знайти найбільш ймовірну, середню квадратичну, середню арифметичну швидкості молекул хлору при температурі 500 К. Побудувати графіки залежності величини цих швидкостей молекули від температури в інтервалі $200 < T < 1000$ К.

2.3. Знайти середню арифметичну швидкість молекул газу, коли відомо, що середня квадратична їх швидкість 400 м/с. Побудувати графік залежності величини середньої арифметичної швидкості молекул вуглекислого газу від температури в інтервалі $200 < T < 1000$ К.

2.4. Визначити ККД двигуна легкового автомобіля, якщо його двигун розвиває ефективну потужність 47 кВт і споживає щогодини 299 г бензину на 1 кВт. Побудувати графік залежності ККД двигуна від маси спожитого щогодини бензину на 1 кВт в інтервалі $150 < m < 400$ г.

2.5. Визначити середню ефективну потужність, яку розвиває двигун легкового автомобіля, що витрачає на 1 км шляху 0,36 л бензину, якщо ККД його 28%, а швидкість 80 км/год. Побудувати графік залежності середньої ефективної потужності двигуна від об'єму витраченого на 1км шляху бензину в інтервалі $0{,}3 < V < 1{,}5$ л.

2.6. Сучасний вантажний автомобіль має двигун потужністю 155 кВт. Визначити витрату пального на 1 км шляху, якщо при швидкості руху 80 км/год він розвиває повну потужність. ККД двигуна 30%. Теплота згоряння пального $q=4{,}27\cdot 10^7$ Дж/кг. Побудувати графік залежності витрати пального на 1 км шляху від швидкості руху в інтервалі $50 < \upsilon < 150$ км/год.

2.7. Внаслідок ізобарного розширення одного моля гелію його об'єм збільшується в 4 рази. Знайти зміну ентропії. Побудувати графік залежності зміни ентропії від величини збільшення об'єму в інтервалі $2 < V_2/V_1 < 10$ разів.

2.8. Газ при температурі 298 К і тиску $0{,}5\cdot 10^5$ Па займає об'єм $2\cdot 10^{-2}$ м^3. Визначити зміну ентропії, якщо газ ізотермічно стискується до об'єму $5,7 \cdot 10^{-3}$ м^3. Побудувати графік залежності зміни ентропії від величини зміни об’єму в інтервалі від $2 \cdot 10^{-2}$ м^3 до $6 \cdot 10^{-3}$ м^3.

2.9. 0,16 кг кисню нагрівають від 323 К до 333 К. Знайти кількість теплоти, що її надано кисню, і зміну внутрішньої енергії у випадку, якщо процес відбувається при сталому об'ємі. В одній системі координат побудувати графіки залежності кількості теплоти, що її надано кисню, і зміни внутрішньої енергії від зміни температури $T_2 - T_1$ при зміні T_2 в інтервалі від 300 К до 400 К.

2.10. 0,16 кг кисню нагрівають від 323 К до 333 К. Знайти кількість теплоти, що її надано кисню, і зміну внутрішньої енергії у випадку, якщо процес відбувається при сталому тиску. В одній системі координат побудувати графіки залежності кількості теплоти, що її надано кисню, і зміни внутрішньої енергії від зміни температури $T_2 - T_1$ при зміні T_2 в інтервалі від 300 К до 400 К.

2.11. 6 кг кисню при сталій температурі 400 К стискують від 0.3 МПа до 3 МПа. Визначити початковий, кінцевий об'єми, що їх займає газ, та роботу, виконану під час його стиснення. Побудувати графік залежності роботи, виконаної під час стиснення газу, від різниці тисків у початковому та кінцевому стані в інтервалі від 0 до 2,7 МПа.

2.12. Щогодини компресор стискує 150 м^3 повітря підвищуючи його тиск від 0.1 до 0.7 МПа. Яку кількість теплоти потрібно відвести від циліндра компресора щоб стиснення повітря відбувалося ізотермічно? Побудувати графік залежності цієї кількості теплоти від різниці тисків у початковому та кінцевому стані в інтервалі від 0 до 0,6 МПа.

2.13. Як зміниться внутрішня енергія 0.1 кг кисню якщо його нагрівати від 283 К до 333 К при сталому тиску? Побудувати графік залежності зміни цієї внутрішньої енергії від різниці температур у початковому та кінцевому стані в інтервалі від 0 до 50 К.

2.14. Внаслідок адіабатного стиснення 1 моля двоатомного газу температура його збільшилася на 7°С. Яку при цьому виконано роботу? Побудувати графік залежності величини цієї роботи від різниці температур у початковому та кінцевому стані в інтервалі 0 < Δt < 50°С.

2.15. Як зміниться внутрішня енергія 0.1 кг кисню якщо його нагрівати від 283 К до 333 К при сталому об'ємі? Побудувати графік залежності зміни цієї внутрішньої енергії від різниці температур у початковому та кінцевому стані в інтервалі 0 < Δt < 50°С.

2.16. Для деякого двохатомного газу питома теплоємність при постійному тиску дорівнює 3.5 кал/(г$\cdot$град) (1 кал=4.19 Дж). Чому дорівнює маса одного кіломоля цього газу? Побудувати діаграми питомої теплоємності при постійному тиску для газів з різною кількістю атомів у молекулі.

2.17. 10г кисню знаходяться під тиском $3 \cdot 10^5$ Н/м^2 при температурі 10°С. Після нагрівання при постійному тиску газ зайняв об’єм 10 л. Знайти:

1) кількість тепла, отриманого газом; 2) енергію теплового руху молекул газу до і після нагрівання. Побудувати графік залежності кількості тепла, отриманого газом, від об’єму, зайнятого ним після нагрівання, в інтервалі $10 < V < 100$ л.

2.18. При деяких умовах середня довжина вільного пробігу молекул вуглекислого газу дорівнює $1.6 \cdot 10^{-7}$ м і середня арифметична швидкість його молекул дорівнює 1.95 км/с. Чому буде дорівнює середнє число зіткнень за 1 с молекул цього газу, якщо при тій же температурі тиск газу зменшити в 1.27 раза? Побудувати графік залежності середнього числа зіткнень за 1 с молекул вуглекислого газу, від тиску в інтервалі $10^4 < V < 10^5$ Па, при постійній температурі 300 К.

2.19. Обчислити середню кінетичну енергію поступального руху і повну середню кінетичну енергію молекул при температурі 273 К для одноатомних, двоатомних і багатоатомних газів. Відповіді порівняти. В одній системі координат побудувати графіки залежності середньої кінетичної енергії поступального руху і повної середньої кінетичної енергії молекул для одноатомних, двоатомних і багатоатомних газів від температури в інтервалі $200 < T < 1000$ К.

2.20. Вуглекислий газ і азот знаходяться при однакових температурі і тиску. Знайти для цих газів відношення: 1) коефіцієнтів дифузії; 2) коефіцієнтів внутрішнього тертя; 3) коефіцієнтів теплопровідності. Діаметри молекул цих газів вважати однаковими. В одній системі координат побудувати графіки залежності коефіцієнтів переносу від температури для даних в інтервалі $200 < T < 1000$ К. Тиск газів вважати нормальним і постійним.

2.21. Молекула азоту при нормальних умовах рухається зі швидкістю 454 м/с. Визначити імпульс молекули. Побудувати графік залежності величини імпульсу молекули від температури в інтервалі $200 < T < 1000$ К.

2.22. Знайти найбільш ймовірну, середню квадратичну, середню арифметичну швидкості молекул хлору при температурі 500 К. Побудувати графіки залежності величини цих швидкостей молекули від температури в інтервалі $200 < T < 1000$ К.

2.23. Знайти середню арифметичну швидкість молекул газу, коли відомо, що середня квадратична їх швидкість 400 м/с. Побудувати графік залежності величини середньої арифметичної швидкості молекул вуглекислого газу від температури в інтервалі $200 < T < 1000$ К.

2.24. Визначити ККД двигуна легкового автомобіля, якщо його двигун розвиває ефективну потужність 47 кВт і споживає щогодини 299 г бензину на 1 кВт. Побудувати графік залежності ККД двигуна від маси спожитого щогодини бензину на 1 кВт в інтервалі $150 < m < 400$ г.

2.25. Визначити середню ефективну потужність, яку розвиває двигун легкового автомобіля, що витрачає на 1 км шляху 0,36 л бензину, якщо ККД його 28%, а швидкість 80 км/год. Побудувати графік залежності середньої ефективної потужності двигуна від об’єму витраченого на 1км шляху бензину в інтервалі 0,3 < V < 1,5 л.

2.26. Сучасний вантажний автомобіль має двигун потужністю 155 кВт. Визначити витрату пального на 1 км шляху, якщо при швидкості руху 80 км/год він розвиває повну потужність. ККД двигуна 30%. Теплота згоряння пального q=$4{,}27\cdot10^7$ Дж/кг. Побудувати графік залежності витрати пального на 1 км шляху від швидкості руху в інтервалі 50 < υ < 150 км/год.

2.27. Внаслідок ізобарного розширення одного моля гелію його об'єм збільшується в 4 рази. Знайти зміну ентропії. Побудувати графік залежності зміни ентропії від величини збільшення об’єму в інтервалі 2 < V_2/V_1 < 10 разів.

2.28. Газ при температурі 298 К і тиску $0{,}5\cdot10^5$ Па займає об'єм $2\cdot10^{-2}$ м^3. Визначити зміну ентропії, якщо газ ізотермічно стискується до об'єму $5{,}7\cdot10^{-3}$ м^3. Побудувати графік залежності зміни ентропії від величини зміни об’єму в інтервалі від $2\cdot10^{-2}$ м^3 до $6\cdot10^{-3}$ м^3.

2.29. 0,16 кг кисню нагрівають від 323 К до 333 К. Знайти кількість теплоти, що її надано кисню, і зміну внутрішньої енергії у випадку, якщо процес відбувається при сталому об'ємі. В одній системі координат побудувати графіки залежності кількості теплоти, що її надано кисню, і зміни внутрішньої енергії від зміни температури $T_2 - T_1$ при зміні T_2 в інтервалі від 300 К до 400 К.

2.30. 0,16 кг кисню нагрівають від 323 К до 333 К. Знайти кількість теплоти, що її надано кисню, і зміну внутрішньої енергії у випадку, якщо процес відбувається при сталому тиску. В одній системі координат побудувати графіки залежності кількості теплоти, що її надано кисню, і зміни внутрішньої енергії від зміни температури $T_2 - T_1$ при зміні T_2 в інтервалі від 300 К до 400 К.

РОЗДІЛ 3. ЕЛЕКТРОСТАТИКА

Основні закони і формули

Закон Кулона	$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$
Напруженість електростатичного поля	$E = \frac{F}{q}$
Потік вектора напруженості електростатичного поля	$\Phi_E = E \cdot S \cdot \cos\alpha$
Теорема Остроградського-Гауса для напруженості електростатичного поля	$\Phi_E = \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} \sum_{i=1}^{n} q_i$
Напруженість електростатичного поля точкового заряду	$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}$
Напруженість електростатичного поля рівномірно зарядженої сфери радіусом R на відстані r від центру сфери: а) всередині сфери ($r < R$); б) на поверхні сфери ($r = R$); в) поза сферою ($r > R$)	а) $E = 0$ б) $E = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{R^2}$ в) $E = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}$
Принцип суперпозиції (накладення) електростатичних полів	$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \ldots + \vec{E}_n$
Напруженість електростатичного поля, створеного нескінченно довгою рівномірно зарядженою ниткою	$E = \frac{1}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \frac{\tau}{r}$
Лінійна густина заряду	$\tau = \frac{dq}{dl}$
Напруженість поля, створена нескінченною рівномірно зарядженою площиною	$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0}$
Поверхнева густина заряду	$\sigma = \frac{dq}{dS}$
Електричне зміщення	$D = \varepsilon\varepsilon_0 E$

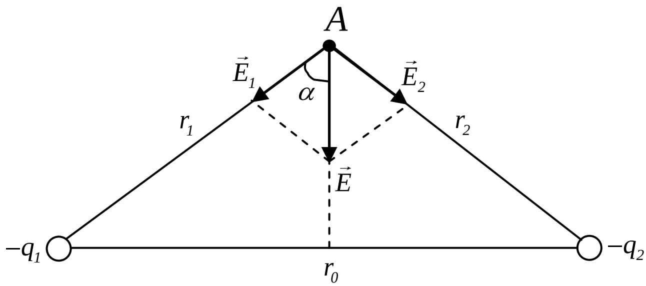
Потенціал електричного поля	$\varphi = \dfrac{W_П}{q}$
Потенціал електростатичного поля точкового заряду	$\varphi = \dfrac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r}$
Потенціал електростатичного поля рівномірно зарядженої сфери радіусом R, на відстані r від центру сфери: а) всередині сфери ($r < R$); б) на поверхні сфери ($r = R$); в) поза сферою ($r > R$)	а) $\varphi = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \dfrac{q}{R}$ б) $\varphi = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \dfrac{q}{R}$ в) $\varphi = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \dfrac{q}{r}$
Потенціал електростатичного поля, створеного системою точкових зарядів	$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + ... + \varphi_n$
Зв'язок напруженості електростатичного поля з потенціалом	$\vec{E} = \overrightarrow{grad}\, \varphi$, $E = \dfrac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = \dfrac{U}{d}$
Робота електростатичного поля по переміщенні точкового заряду	$A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$
Електрична ємність конденсатора	$C = \dfrac{q}{U}$
Електрична ємність плоского конденсатора	$C = \dfrac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$
Енергія зарядженого конденсатора	$W = \dfrac{CU^2}{2} = \dfrac{q^2}{2C} = \dfrac{qU}{2}$
Об'ємна густина енергії електростатичного поля	$\omega = \dfrac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} = \dfrac{ED}{2}$

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Два однакових негативних заряди величиною 9 нКл кожний знаходяться у воді на відстані 8 см один від одного. Визначити напруженість і потенціал поля в точці, розташованій на відстані 5 см від кожного із зарядів.

Дано: $q_1 = q_2 =$ 9 нКл; r_0 =8 см; $r_1 = r_2 = 5$ см

Знайти: $E, \varphi - ?$



Напруженість поля, в точці A, яку створюють заряди q_1 і q_2 згідно з принципом суперпозиції полів, дорівнює векторній сумі напруженостей електричних полів, створюваних кожним із зарядів окремо:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 . \tag{1}$$

За теоремою косинусів,

$$E = \sqrt{E_1^{\ 2} + E_2^{\ 2} + 2E_1E_2 \cos 2\alpha} . \tag{2}$$

Напруженість поля точкового заряду q:

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} ,$$

де ε – діелектрична проникність; ε_0 – електрична стала; r – відстань від заряду до точки поля, в якій визначається його напруженість. Заряди q_1 та q_2 від'ємні, тому вектори $\vec{E}_1$ та $\vec{E}_2$ направлені вздовж ліній напруженості до зарядів. За умовою задачі, заряди $q_1 = q_2$ і розташовані на однаковій відстані від точки A, тому $E_1 = E_2$. Таким чином , формула (2) матиме вигляд:

$$E = 2E_1 cos\alpha ,$$

де $cos\alpha = h / r_1$; $h = \sqrt{r_1^2 - r_0^2 / 4}$.

$$h = \sqrt{\left(5 \cdot 10^{-2}\right)^2 - \left(4 \cdot 10^{-2}\right)^2} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Тому напруженість у точці A буде

$$E = \frac{2Q_1 \cdot h}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_1^3} . \tag{3}$$

Обчислимо:

$$E = \frac{2 \cdot 9 \cdot 10^{-9}\,\text{Кл} \cdot 3 \cdot 10^{-2}\,\text{м}}{4 \cdot 3{,}14 \cdot 81 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}\,\text{Ф} / \text{м} \cdot (0{,}05)^3 \text{м}^3} = 480 \text{ В} / \text{м}.$$

Потенціал φ, що створюється системою точкових зарядів у даній точці поля, дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів, які створюються кожним із зарядів: $\varphi = \sum_{i=1}^{n} \varphi_i$. Тому потенціал φ результуючого поля в точці A дорівнює $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$. Так як потенціал поля, створений точковим зарядом, рівний: $\varphi = q / 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r$, то отримаємо:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = \frac{q_1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_1} + \frac{q_2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_2} = \frac{2q_1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_1}. \tag{4}$$

Обчислимо:

$$\varphi = \frac{2 \cdot 9 \cdot 10^{-9}\,\text{Кл}}{4 \cdot 3{,}14 \cdot 81 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}\,\text{Ф / м} \cdot 5 \cdot 10^{-2}\,\text{м}} = -40\ \text{В}$$

Підставляючи у формули (3) і (4) числові значення r можна побудувати графічні залежності цих величин.

Задача 2. Вздовж тонкого дротяного кільця радіуса R=10 см рівномірно розподілений додатній заряд q=5,0·10^{-9} Кл. Знайти напруженість електричного поля на осі кільця в точці, розміщеної від центру кільця на відстані L.

Візьмемо елемент кільця dl. Заряд dq, який знаходиться на ньому можна вважати точковим. Тоді напруженість електричного поля в точці, створеної цим елементом dl:

$$dE = \frac{dq}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 r^2}.$$

Вона направлена вздовж радіус-вектора $\vec{r}$, від елемента кільця до точки, в якій знаходимо напруженість.

Згідно принципу суперпозиції результуюча напруженість в точці рівна векторній сумі напруженостей полів, створених в цій точці кожним елементом кільця з зарядом dq. Виразимо вектор $d\vec{E}$ через складові $d\vec{E}_\tau$, направлену вздовж осі кільця, і $d\vec{E}_n$, направлену перпендикулярно осі.

$$d\vec{E} = d\vec{E}_\tau + d\vec{E}_n.$$

Складові $d\vec{E}_n$ кожних двох діаметрально протилежних елементів взаємно компенсуються. Це пояснюється тим, що для кожного елемента зарядом dq існує діаметрально протилежний елемент зарядом dq', тому

$$d\vec{E}_n + d\vec{E}'_n = 0.$$

Отже, результуюча напруженість в точці рівна сумі складових напруженостей вздовж осі кільця, а модуль напруженості рівний сумі модулів цих складових, так як напрямки їх однакові.

$$dE_\tau = dE\cos\alpha = dE\frac{L}{r} = \frac{Ldq}{4\pi\cdot\varepsilon\cdot\varepsilon_0 r^3}.$$

Тоді

$$dE = \frac{Ldq}{4\pi\cdot\varepsilon\cdot\varepsilon_0 r^3}.$$

Враховуючи це, отримаємо:

$$E = \int \frac{Ldq}{4\pi\cdot\varepsilon\cdot\varepsilon_0 r^3} = \frac{L}{4\pi\cdot\varepsilon\cdot\varepsilon_0 r^3}\int dq = \frac{Lq}{4\pi\cdot\varepsilon\cdot\varepsilon_0 r^3}. \qquad (1)$$

Враховуючи, що $r^2 = R^2 + L^2$, отримаємо напруженість електричного поля на осі кільця:

$$E = \frac{Lq}{4\pi\cdot\varepsilon\cdot\varepsilon_0 (R^2 + L^2)^{3/2}}. \qquad (2)$$

Задачі для самостійного розв’язування

3.1. Дві кульки із зарядами 6,67 нКл і 13,33 нКл знаходяться на відстані 40 см. Яку роботу слід виконати, щоб наблизити їх до відстані 25 см? Зобразити графічно розподіл потенціальної енергії електростатичної взаємодії цих двох кульок у інтервалі: $10 \le r \le 50$ см.

3.2. Кулька масою 1 г і зарядом 10 нКл до переміщається з точки А, потенціал якої рівний 600 В, в точку В, потенціал якої рівний нулю. Чому була рівна її швидкість в точці А, якщо в точці В вона стала рівною 20 см/с? Зобразити графічно розподіл потенціальної енергії електростатичної взаємодії кульки і її кінетичної енергії на відрізку між точками А і В.

3.3. На відстані 4 см від нескінченно довгої зарядженої нитки знаходиться точковий заряд 0,67 нКл. Під дією поля заряд переміщається на відстань 2 см; при цьому виконується робота 5 мкДж. Знайти лінійну густину заряду нитки. Зобразити графічно розподіл потенціальної енергії електростатичної взаємодії цього точкового заряду у інтервалі: $1 \le r \le 5$ см.

3.4. Біля зарядженої нескінченної площини знаходиться точковий заряд 0,67 нКл. Під дією поля заряд переміщується по силовій лінії на відстань 2 см; при цьому виконується робота 5 мкДж. Знайти поверхневу густину заряду на площині. Зобразити графічно розподіл потенціальної енергії електростатичної взаємодії цього точкового заряду у інтервалі: $0 < r \le 5$ см.

3.5. Електричне поле створено двома паралельними пластинами, що знаходяться на відстані 2 см одна від одної; різниця потенціалів між ними 120 В. Яку швидкість отримає електрон під дією поля, пройшовши по силовій лінії відстань 3мм? Зобразити графічно розподіл кінетичної енергії електрона у інтервалі: $0 < r < 2$ см.

3.6. Вісім заряджених водяних крапель радіусом 1 мм і зарядом 10^{-10} Кл кожна зливаються в одну велику водяну краплю. Знайти потенціал великої краплі. Зобразити графічно розподіл потенціалу великої водяної краплини вздовж її радіусу в інтервалі: 0< $r\ \leq 5$ см.

3.7. Дві металеві кульки, перша із зарядом 10^{-8} Кл і радіусом 3 см і друга радіусом 2 см і потенціалом 9000 В, сполучені дротиною, ємністю якої можна нехтувати. Знайти: 1) потенціал першої кульки до розряду; 2) заряд другої кульки до розряду; 3) енергію кожної кульки до розряду. Для випадку, коли кулі не сполучені дротиною, зобразити графічно розподіл потенціалу створеного цими кулями вздовж прямої, що їх з'єднує, якщо відстань між кулями рівна 50 см.

3.8. За умовою попередньої задачі знайти заряд і потенціал першої кульки після розряду та заряд і потенціал другої кульки після розряду. Для випадку, коли кулі від'єднали від дротини, зобразити графічно розподіл потенціалу створеного цими кулями вздовж прямої, що їх з'єднує, якщо відстань між кулями рівна 50 см.

3.9. Заряджена куля А радіусом 2 см приводиться в зіткнення з незарядженою кулею В, радіус якої 3см. Після того, як кулі роз'єднали, енергія кулі В виявилася рівною 0.4 Дж. Який заряд був на кулі А до їх зіткнення? Для випадку, коли кулі роз'єднали, зобразити графічно розподіл потенціалу створеного цими кулями вздовж прямої, що їх з'єднує, якщо відстань між кулями рівна 50 см.

3.10. Електрон з деякою початковою швидкістю влітає в плоский конденсатор паралельно пластинам на рівній відстані від них. До пластин конденсатора прикладена різниця потенціалів 300 В. Відстань між пластинами 2 см, довжина конденсатора 10 см. Яка повинна бути гранична початкова швидкість електрона, щоб електрон не вилетів з конденсатора? Розв'язати цю ж задачу для альфа-частки. Для обох частинок зобразити траєкторію їх руху в конденсаторі у відповідному масштабі.

3.11. Побудувати графік залежності сили взаємодії між двома точковими зарядами від відстані між ними в інтервалі $2 \leq r \leq 10$ см через кожні 2см. Заряди відповідно рівні $2 \cdot 10^{-8}$ Кл і $3 \cdot 10^{-8}$ Кл.

3.12. Два позитивних точкових заряди q і $4q$ закріплені на відстані 60 см один від одного. Визначити, в якій точці на прямій, яка проходить через заряди, слід розмістити третій заряд q_1, так, щоб він знаходився в рівновазі. Вказати, який знак повинен мати цей заряд для того, щоб рівновага була стійкою.

3.13. У центр квадрата, у вершинах якого знаходиться заряди по $2{,}33 \cdot 10^{-9}$ Кл, поміщений негативний заряд. Знайти величину цього заряду, якщо результуюча сила, діюча на кожний заряд, рівна нулю.

3.14. Два точкові заряди $q_1=2q$ і $q_2= -\ q$ знаходяться на відстані d один від одного. Знайти положення точки на прямій, яка проходить через ці заряди, напруженість E поля в якій рівна нулю.

3.15. Електричне поле створене двома точковими зарядами 10 нКл і -20 нКл, що знаходяться на відстані 20 см один від одного. Визначити напруженість поля в точці, яка віддалена від першого заряду на 30 см і від другого на 50 см.

3.16. Накреслити на одному графіку криву залежності напруженості електричного поля від відстані в інтервалі $1 \le r \le 5$ см через кожний 1 см, якщо поле створене: 1) точковим зарядом 33,3 нКл; 2) нескінченно довгою зарядженою ниткою з лінійною густиною заряду 1,67 нКл/см; 3) нескінченно протяжною зарядженою площиною з поверхневою густиною заряду 2,5 нКл/см^2.

3.17. Побудувати графік залежності потенційної електростатичної енергії двох точкових зарядів від відстані між ними в інтервалі $2 \le r \le 10$ см через кожні 2 см. Заряди рівні q_1=10^{-9} Кл і q_2=3·10^{-9} Кл; ε=1. Графік побудувати для випадків: 1) заряди однойменні; 2) заряди різнойменні.

3.18. Кулька масою 40 мг, заряджена позитивним зарядом 1 нКл, рухається із швидкістю 10 см/с. На яку відстань r_0 може наблизитися кулька до позитивного точкового заряду 1,33 нКл? Зобразити графічно розподіл потенціалу, створеного позитивним точковим зарядом 1,33 нКл в інтервалі: $0{,}1\, r_0 \le r \le 2\, r_0$.

3.19. На яку відстань r_0 можуть наблизитися два електрони, якщо вони рухаються назустріч один одному з відносною швидкістю, рівною 108 см/с? Зобразити графічно розподіл потенціальної енергії взаємодії цих електронів у інтервалі: $0{,}1\, r_0 \le r \le 2\, r_0$.

3.20. Протон (ядро атома водню) рухається із швидкістю 7,7·10^8 см/с. На яку найменшу відстань r_0 може наблизитися цей протон до ядра атома алюмінію? Заряд ядер атомів алюмінію $q=Ze_0$, де Z - порядковий номер атома в таблиці Менделєєва і e_o — заряд протона, чисельно рівний заряду електрона. Масу протона рахувати рівною масі атома водню. Протон і ядро атома алюмінію вважати точковими зарядами. Впливом електронної оболонки атома алюмінію знехтувати. Зобразити графічно розподіл потенціальної енергії взаємодії протона і ядра алюмінію у інтервалі: $0{,}1\, r_0 \le r \le 2\, r_0$.

3.21. Дві кульки із зарядами 6,67 нКл і 13,33 нКл знаходяться на відстані 40 см. Яку роботу слід виконати, щоб наблизити їх до відстані 25 см? Зобразити графічно розподіл потенціальної енергії електростатичної взаємодії цих двох кульок у інтервалі: $10 \le r \le 50$ см.

3.22. Кулька масою 1 г і зарядом 10 нКл до переміщається з точки А, потенціал якої рівний 600 В, в точку В, потенціал якої рівний нулю. Чому була рівна її швидкість в точці А, якщо в точці В вона стала рівною 20 см/с? Зобразити графічно розподіл потенціальної енергії електростатичної взаємодії кульки і її кінетичної енергії на відрізку між точками А і В.

3.23. На відстані 4 см від нескінченно довгої зарядженої нитки знаходиться точковий заряд 0,67 нКл. Під дією поля заряд переміщається на відстань 2 см; при цьому виконується робота 5 мкДж. Знайти лінійну густину заряду нитки. Зобразити графічно розподіл потенціальної енергії електростатичної взаємодії цього точкового заряду у інтервалі: $1 \leq r \leq 5$ см.

3.24. Біля зарядженої нескінченної площини знаходиться точковий заряд 0,67 нКл. Під дією поля заряд переміщується по силовій лінії на відстань 2 см; при цьому виконується робота 5 мкДж. Знайти поверхневу густину заряду на площині. Зобразити графічно розподіл потенціальної енергії електростатичної взаємодії цього точкового заряду у інтервалі: $0< r \leq 5$ см.

3.25. Електричне поле створено двома паралельними пластинами, що знаходяться на відстані 2 см одна від одної; різниця потенціалів між ними 120 В. Яку швидкість отримає електрон під дією поля, пройшовши по силовій лінії відстань 3мм? Зобразити графічно розподіл кінетичної енергії електрона у інтервалі: $0< r <2$ см.

3.26. Вісім заряджених водяних крапель радіусом 1 мм і зарядом 10^{-10} Кл кожна зливаються в одну велику водяну краплю. Знайти потенціал великої краплі. Зобразити графічно розподіл потенціалу великої водяної краплини вздовж її радіусу в інтервалі: $0< r \leq 5$ см.

3.27. Дві металеві кульки, перша із зарядом 10^{-8} Кл і радіусом 3 см і друга радіусом 2 см і потенціалом 9000 В, сполучені дротиною, ємністю якої можна нехтувати. Знайти: 1) потенціал першої кульки до розряду; 2) заряд другої кульки до розряду; 3) енергію кожної кульки до розряду. Для випадку, коли кулі не сполучені дротиною, зобразити графічно розподіл потенціалу створеного цими кулями вздовж прямої, що їх з'єднує, якщо відстань між кулями рівна 50 см.

3.28. За умовою попередньої задачі знайти заряд і потенціал першої кульки після розряду та заряд і потенціал другої кульки після розряду. Для випадку, коли кулі від'єднали від дротини, зобразити графічно розподіл потенціалу створеного цими кулями вздовж прямої, що їх з'єднує, якщо відстань між кулями рівна 50 см.

3.29. Заряджена куля А радіусом 2 см приводиться в зіткнення з незарядженою кулею В, радіус якої 3см. Після того, як кулі роз'єднали, енергія кулі В виявилася рівною 0.4 Дж. Який заряд був на кулі А до їх зіткнення? Для випадку, коли кулі роз'єднали, зобразити графічно розподіл потенціалу створеного цими кулями вздовж прямої, що їх з'єднує, якщо відстань між кулями рівна 50 см.

3.30. Електрон з деякою початковою швидкістю влітає в плоский конденсатор паралельно пластинам на рівній відстані від них. До пластин конденсатора прикладена різниця потенціалів 300 В. Відстань між пластинами 2 см, довжина конденсатора 10 см. Яка повинна бути гранична початкова швидкість електрона, щоб електрон не вилетів з конденсатора? Розв'язати цю ж задачу для альфа-частки. Для обох частинок зобразити траєкторію їх руху в конденсаторі у відповідному масштабі.

РОЗДІЛ 4. ЗАКОНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Основні закони і формули

Сила постійного струму	$I=\dfrac{q}{t}$
Густина електричного струму	$j=\dfrac{I}{S}$
Опір однорідного провідника	$R=\rho\dfrac{l}{S}$
Електропровідність провідника	$G=\dfrac{1}{R}$
Питома електропровідність речовини	$\sigma=\dfrac{1}{\rho}$
Залежність питомого опору металевого зразка від температури	$\rho=\rho_0(1+\alpha t)$
Опір провідників: а) послідовне з'єднання провідників: б) паралельне з'єднання провідників:	$R=\sum\limits_{i=1}^{n}R_i$ $\dfrac{1}{R}=\sum\limits_{i=1}^{n}\dfrac{1}{R_i}$
Закон Ома для неоднорідної ділянки кола	$I=\dfrac{(\varphi_1-\varphi_2)+\varepsilon_{12}}{R}=\dfrac{U}{R}$
Закон Ома для однорідної ділянки кола	$I=\dfrac{\varphi_1-\varphi_2}{R}=\dfrac{U}{R}$
Закон Ома для замкненого кола	$I=\dfrac{\varepsilon}{R+r}$
Перше правило Кірхгофа	$\sum\limits_{k=1}^{n}I_k=0$
Друге правило Кірхгофа	$\sum\limits_{k=1}^{n}I_kR_k=\sum\limits_{i=1}^{m}\varepsilon_i$
Робота, яка виконується електричним струмом на ділянці кола	$A=IUt=I^2Rt=\dfrac{U^2}{R}t$
Потужність струму на ділянці кола	$P=IU=I^2R=\dfrac{U^2}{R}$
Закон Джоуля-Ленца	$Q=I^2Rt$

Густина струму	$j = en\langle \upsilon \rangle$
Закон Ома в диференціальній формі	$j = \sigma E$
Закон Джоуля-Ленца в диференціальній формі	$\omega = \sigma E^2$
Термо-е.р.с., яка виникає в термопарі	$\varepsilon = \alpha(T_1 - T_2)$
Перший закон Фарадея для електролізу	$m = kq$
Другий закон Фарадея для електролізу	$k = \frac{M}{FZ}$, $F = 96.5$ кКл/моль
Рухливість носіїв заряду	$\mu = \frac{\langle \upsilon \rangle}{E}$
Закон Ома в диференціальній формі для електролітів і газів	$j = qn(\mu_+ + \mu_-)E$
Густина струму насичення при термоелектронній емісії	$j_{нас} = BT^2 e^{-\frac{A}{kT}}$

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Джерело струму з е.р.с. ε і внутрішнім опором r замкнуте на реостат. Виразити потужність P_1, яка виділяється на зовнішній частині кола як функцію сили струму. При якій силі струму потужність буде максимальною.

Дано: ε, r.

Знайти: $P_1 - ?$

Повна потужність джерела струму:

$$P = I\varepsilon .$$

Частина цієї потужності $P_2 = I^2 r$ виділяється всередині, інша у зовнішній частині кола:

$$P_1 = I\varepsilon - I^2 r . \qquad (1)$$

Графіком цієї функції являється парабола, вітки якої направлені вниз. Перетворимо вираз (1):

$$P_1 = r\left(I^2 - 2\frac{\varepsilon}{2r}I + \frac{\varepsilon^2}{4r^2} - \frac{\varepsilon^2}{4r^2}\right) = -r\left(I - \frac{\varepsilon}{2r}\right)^2 + \frac{\varepsilon^2}{4r} . \qquad (2)$$

Звідси видно, координати вершини параболи знаходяться в точці:

$$I_1 = \varepsilon / (2r), \; P_{1m} = \varepsilon^2 / (4r) .$$

Таким чином при силі струму

$$I_1 = \varepsilon / (2r) \qquad (3)$$

потужність, що виділяється у зовнішній частині кола буде мати максимальне значення:

$$P_{1m} = \varepsilon^2 / (4r) .$$

Нехай зовнішня ділянка кола має опір R, при якому сила струму рівна I_1. Тоді згідно закону Ома для замкнутого кола:

$$I_1 = \varepsilon / (R + r) .$$

Порівнюючи даний вираз з формулою (3) знаходимо, що:

$$R = r .$$

Таким чином корисна потужність (потужність, яка виділяється зовнішній ділянці кола) максимальна в тому випадку, коли внутрішній опір джерела рівний опору зовнішньої ділянки кола. При цьому к.к.д. джерела струму:

$$\eta = \frac{R}{R + r} = \frac{r}{2r} = 0{,}5 \text{ або } \eta = 50\% .$$

Задача 2. Джерело струму, е.р.с. якого ε і внутрішній опір r, замкнуте на зовнішній опір R. При зміні опору сила струму в колі також змінюється. Знайти залежність к.к.д. джерела η від сили струму I.

Дано: ε , r , R , I .

Знайти: $\eta - ?$

ККД джерела струму:

$$\eta = \frac{P_1}{P} , \tag{1}$$

де P_1 - потужність, що виділяється на зовнішньому колі (корисна потужність); P - повна потужність джерела. Корисну потужність можна виразити як різницю між повною потужністю і потужністю P_2, яка виділяється всередині джерела:

$$P_1 = P - P_2 .$$

При силі струму I і е.р.с. ε будемо мати:

$$P = I\varepsilon ,$$

$$P_2 = I^2 r ,$$

де r - внутрішній опір джерела.

Тоді:

$$P_1 = I\varepsilon - I^2 r .$$

Підставивши значення P_1 і P_2 у формулу (1), отримаємо:

$$\eta = \frac{I\varepsilon - I^2 r}{I\varepsilon} = 1 - \frac{r}{\varepsilon} I .$$

Графіком залежності к.к.д. джерела струму η від сили струму I являється пряма. Видно, що при силі струму $I_0 = \varepsilon / r$, тобто при короткому замиканні, к.к.д. джерела рівний нулю.

Задача 3. Визначити питомий опір провідника довжиною 2 м, якщо при густині струму 10^6 А/м^2 на його кінцях підтримується різниця потенціалів 2 В.

Дано: $l = 2$ м, $j = 10^6$ А/м^2, $U = 2$ В.

Знайти: $\rho - ?$

Згідно означення густини струму:

$$j = \frac{I}{S}, \tag{1}$$

де I - сила струму, S - площа поперечного перерізу провідника.

За законом Ома:

$$U = IR, \tag{2}$$

де U - напруга на кінцях провідника, I - сила струму, R - опір провідника.

Опір провідника:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \tag{3}$$

де ρ - питомий опір провідника, l - довжина провідника, S - площа поперечного перерізу провідника.

Підставивши у формулу (1) вирази для I та R з формул (2) та (3), отримаємо:

$$j = \frac{U}{\rho l},$$

звідки знайдемо питомий опір провідника:

$$\rho = \frac{U}{jl}.$$

Підставивши в останню формулу дані умови задачі отримаємо:

$$\rho = 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}.$$

Задача 4. На балоні електролампи написано 300 Вт, 110 В. Який додатковий опір потрібно приєднати до цієї лампи, щоб при напрузі 127 В вона працювала у нормальному режимі?

Дано: $U = 110$ В, $P = 300$ Вт, $U_1 = 127$ В.

Знайти: $R_д - ?$

Лампа розрахована на потужність $P = 300$ Вт і напругу $U = 110$ В. Струм через лампу:

$$I = \frac{P}{U}, \tag{1}$$

Опір лампи:

$$R = \frac{U}{I}. \tag{2}$$

При напрузі $U_1 = 127$ В для нормальної роботи лампи через неї повинен проходити такий же струм I. Щоб його одержати, до джерела напруги послідовно з лампою повинен бути ввімкнений додатковий опір, на якому спадатиме надлишок напруги.

Величина сумарного опору ділянки кола з урахуванням (1):

$$R_{сум} = \frac{U_1}{I} = \frac{U_1 U}{P}.$$

Знаючи опір лампи (2), визначимо величину додаткового опору:

$$R_д = R_{сум} - R = \frac{U_1 U}{P} - \frac{U}{I}.$$

Звідси величина додаткового опору:

$$R_д = 10{,}4 \text{ Ом}.$$

Задачі для самостійного розв'язування

4.1. При зовнішньому опорі 3Ом сила струму в колі дорівнює $0{,}8$А, а при опорі 14Ом - сила струму дорівнює $0{,}2$А. Визначити величину максимальної потужності, що може виділитись у зовнішньому колі даного джерела струму.

4.2. Підйомний кран піднімає вгору з постійною швидкістю вантаж масою $0{,}6$т за 40с на висоту 16м. Двигун працює під напругою 220В. Знайти струм, що споживає двигун, якщо його к.к.д. дорівнює 80%.

4.3. Ламповий реостат складається з п'яти електричних ламп, включених паралельно. Знайти опір реостата: 1) коли горять всі лампи; 2) коли вигвинчуються: а) одна; б) дві; в) три; г) чотири лампи. Опір кожної лампи рівний 350 Ом.

4.4. Визначити густину струму, який проходить по резисторі довжиною 5 м, якщо на кінцях його підтримується різниця потенціалів 2 В. Питомий опір матеріалу 2 мкОм·м.

4.5. Спад напруги в зовнішньому колі рівний 5.1В. Визначити силу струму в колі, е.р.с. і к.к.д. джерела струму, якщо його внутрішній опір 1.5 Ом, а опір зовнішнього кола 8,5 Ом.

4.6. Електрорушійна сила елемента рівна 6 В. При зовнішньому опорі, рівному 1,1 Ом сила струму в ланцюзі рівна 3 А. Знайти падіння потенціалу усередині елемента і його опір.

4.7. Елемент, реостат і амперметр включені послідовно. Елемент має е.р.с. 2 В і внутрішній опір 0,4 Ом. Амперметр показує силу струму 1 А. З яким к.к.д. працює елемент?

4.8. Дві групи з трьох послідовно з'єднаних елементів сполучено паралельно. е.р.с. кожного елемента рівна 1,2 В, внутрішній опір 0,2 Ом. Отримана батарея замкнута на зовнішній опір 1,5 Ом. Знайти силу струму в зовнішньому колі.

4.9. Різниця потенціалів між двома точками А і В рівна 9 В. Є два провідники, опори яких рівні відповідно 5 і 3 Ом. Знайти кількість тепла, що виділяється в кожному з провідників за 1 с, якщо провідники між А і В включені: 1) послідовно; 2) паралельно.

4.10. Електричний чайник має дві обмотки. При включенні одній з них вода в чайнику закипить через 15 хв, при включенні другій - через 30 хв. Через скільки часу закипить вода в чайнику, якщо включити обидві обмотки: 1) послідовно; 2) паралельно?

4.11. Дві групи з трьох послідовно з'єднаних елементів з'єднали паралельно. Е.р.с. кожного елемента дорівнює $1{,}2\,\text{В}$, внутрішній опір $0{,}2\,\text{Ом}$. Одержана батарея замкнута на зовнішній опір $1{,}5\,\text{Ом}$. Знайти силу струму у зовнішньому колі.

4.12. Елемент з е.р.с. 1,1 В і внутрішнім опором 1 Ом замкнутий на зовнішній опір 9 Ом. Знайти: 1) силу струму в колі; 2) падіння потенціалу на зовнішній ділянці; 3) падіння потенціалу всередині елемента; 4) з яким к.к.д. працює елемент.

4.13. Побудувати графік залежності падіння потенціалу в зовнішньому колі від зовнішнього опору для електричного кола попередньої задачі. Зовнішній опір узяти в межах $0 \le R \le 10\,\text{Ом}$ через кожні 2 Ом.

4.14. До джерела з е.р.с. $1{,}5\,\text{В}$ приєднали котушку з опором $0{,}1\,\text{Ом}$. Амперметр показав силу струму, що дорівнює $0{,}5\,\text{А}$. Коли до джерела струму приєднали послідовно ще одне джерело струму з такою ж е.р.с., то сила струму в тій же котушці виявилась рівною $0{,}4\,\text{А}$. Визначити внутрішній опір першого і другого джерел струму.

4.15. З мідного дроту довжиною $120\,\text{м}$ і площею поперечного перерізу $24\,\text{мм}^2$ намотано котушку. Знайти приріст опору котушки при нагріванні її від 20^0С до 70^0С.

4.16. Як треба з'єднати 12 елементів з е.р.с. $1{,}2\,\text{В}$ і внутрішнім опором $0{,}4\,\text{Ом}$, щоб одержати максимальну силу струму в зовнішньому колі, опір якого $0{,}3\,\text{Ом}$? Визначити цю силу струму.

4.17. Лампа, ввімкнена в мережу напругою $200\,\text{В}$, споживає потужність $40\,\text{Вт}$ і яскраво горить, причому температура нитки 3000^0С. При ввімкненні в мережу напругою $100\,\text{В}$ лампа споживає потужність $25\,\text{Вт}$ і ледве світиться, оскільки температура нитки її 1000^0С. Знайти опір нитки лампи при температурі 0^0С.

4.18. Електричний чайник місткістю $1{,}5\,\text{дм}^3$ має опір нагрівального елемента $80\,\text{кОм}$, к.к.д. 80% і працює при напрузі $220\,\text{В}$. Початкова температура води 20^0С. Визначити потужність струму, яку споживає чайник, силу струму в нагрівальному елементі і час, протягом якого вода в чайнику закипить.

4.19. Три провідники опорами $3\,\text{Ом}$, $4\,\text{Ом}$ та $5\,\text{Ом}$ з'єднані паралельно. На першому провіднику за певний час виділяється $20\,кДж$ теплоти. Визначити кількість теплоти, що виділяється на третьому провіднику.

4.20. Обмотка електричного кип'ятильника має дві секції. Якщо ввімкнена тільки перша секція, то вода закипає через $15\,хв$, якщо тільки друга, то через $30\,хв$. Через скільки хвилин закипить вода, якщо обидві секції ввімкнути послідовно?

4.21. При зовнішньому опорі $3\,Ом$ сила струму в колі дорівнює $0{,}8\,А$, а при опорі $14\,Ом$ - сила струму дорівнює $0{,}2\,А$. Визначити величину максимальної потужності, що може виділитись у зовнішньому колі даного джерела струму.

4.22. Підйомний кран піднімає вгору з постійною швидкістю вантаж масою $0{,}6\,т$ за $40\,с$ на висоту $16\,м$. Двигун працює під напругою $220\,В$. Знайти струм, що споживає двигун, якщо його к.к.д. дорівнює 80%.

4.23. Ламповий реостат складається з п'яти електричних ламп, включених паралельно. Знайти опір реостата: 1) коли горять всі лампи; 2) коли вигвинчуються: а) одна; б) дві; в) три; г) чотири лампи. Опір кожної лампи рівний 350 Ом.

4.24. Визначити густину струму, який проходить по резисторі довжиною 5 м, якщо на кінцях його підтримується різниця потенціалів 2 В. Питомий опір матеріалу 2 мкОм·м.

4.25. Спад напруги в зовнішньому колі рівний 5.1В. Визначити силу струму в колі, е.р.с. і к.к.д. джерела струму, якщо його внутрішній опір 1.5 Ом, а опір зовнішнього кола 8,5 Ом.

4.26. Електрорушійна сила елемента рівна 6 В. При зовнішньому опорі, рівному 1,1 Ом сила струму в ланцюзі рівна 3 А. Знайти падіння потенціалу усередині елемента і його опір.

4.27. Елемент, реостат і амперметр включені послідовно. Елемент має е.р.с. 2 В і внутрішній опір 0,4 Ом. Амперметр показує силу струму 1 А. З яким к.к.д. працює елемент?

4.28. Дві групи з трьох послідовно з'єднаних елементів сполучено паралельно. е.р.с. кожного елемента рівна 1,2 В, внутрішній опір 0,2 Ом. Отримана батарея замкнута на зовнішній опір 1,5 Ом. Знайти силу струму в зовнішньому колі.

4.29. Різниця потенціалів між двома точками А і В рівна 9 В. Є два провідники, опори яких рівні відповідно 5 і 3 Ом. Знайти кількість тепла, що виділяється в кожному з провідників за 1 с, якщо провідники між А і В включені: 1) послідовно; 2) паралельно.

4.30. Електричний чайник має дві обмотки. При включенні одній з них вода в чайнику закипить через 15 хв, при включенні другій - через 30 хв. Через скільки часу закипить вода в чайнику, якщо включити обидві обмотки: 1) послідовно; 2) паралельно?

РОЗДІЛ 5. ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Основні закони і формули

Співвідношення між індукцією і напруженістю магнітного поля	$B = \mu\mu_0 H$
Сила Ампера	$F_A = IBl\sin\alpha$
Сила Лоренца	$F_л = q\upsilon B\sin\alpha$
Різниця потенціалів ефекту Холла	$\Delta\varphi = \frac{1}{qn_0}\frac{IB}{a}$
Радіус орбіти зарядженої частинки в магнітному полі	$r = \left\lvert\frac{m}{q}\right\rvert\frac{\upsilon_\perp}{B}$
Період обертання зарядженої частинки в магнітному полі	$T = \left\lvert\frac{m}{q}\right\rvert\frac{2\pi}{B}$
Крок гвинтової траєкторії	$h = \upsilon_{//}T$
Рухливість носіїв заряду	$u = \frac{\upsilon}{E}$
Густина струму	$j = en_0uE$
Питома електрична провідність	$\sigma = en_0u$
Закон Біо-Савара-Лапласа	$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{Idl\sin\alpha}{r^2}$
Індукція магнітного поля, створеного прямолінійним провідником із струмом	$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{I}{r_0}(\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2)$
Індукція магнітного поля, створеного безконечним прямолінійним провідником із струмом	$B = \frac{\mu\mu_0}{2\pi}\frac{I}{r_0}$
Індукція магнітного поля колового струму в центрі витка	$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2r}$
Індукція магнітного поля колового струму на осі витка	$B = \frac{\mu\mu_0}{2}\frac{Ir^2}{(r^2 + h^2)^{3/2}}$
Магнітний момент витка	$P_m = IS$
Напруженість магнітного поля в ідеальному тороїді і соленоїді	$H = nI$
Напруженість магнітного поля на осі реального соленоїда	$H = \frac{nI}{2}(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1)$
Елементарний потік вектора магнітної індукції	$d\Phi_m = BdS\cos\alpha$

Робота по переміщенні провідника із струмом в магнітному полі	$dA = I\,d\Phi_m$
Момент сили, яка діє на контур із струмом в магнітному полі	$M = P_m B \sin\alpha$
Електрорушійна сила індукції	$\varepsilon_i = -\dfrac{d\Psi}{dt}, \quad \Psi = N\Phi_m$
Магнітний потік самоіндукції	$\Phi_{mc} = IL$
Індуктивність ідеального соленоїда	$L = \mu\mu_0 n^2 V$
Залежність струму від часу в перехідних процесах	$I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} + \dfrac{\varepsilon}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t})$
Електрорушійна сила взаємної індукції	$\varepsilon_2 = -\dfrac{d}{dt}(M_{21}I_1)$
Енергія магнітного поля	$W_m = \dfrac{LI^2}{2}$
Кількість електрики, що пройшла через провідник при виникненні в ньому індукційного струму	$dq = -\dfrac{1}{R}d\Phi_m$

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Електрон, пройшовши прискорюючу різницю потенціалів 88 кВ, влітає в однорідне магнітне поле перпендикулярно до його лінії індукції. Індукція магнітного поля рівна 0,01 Тл. Визначити радіус траєкторії електрона.

Дано: $e = 1{,}6\cdot 10^{-19}$ Кл, $m = 9{,}1\cdot 10^{-31}$ кг, $B = 0{,}01$ Тл, $U = 88\cdot 10^{6}$ В.

Знайти: $r - ?$

У магнітному полі з індукцією B на електрон, що рухається з швидкістю $\vec{\upsilon}$ перпендикулярно до $\vec{B}$, діє сила Лоренца:

$$F = e\upsilon B. \qquad (1).$$

Вона надає електрону доцентрового прискорення при його русі по колу:

$$e\vartheta B = m\frac{\vartheta^2}{r}, \qquad (2)$$

де m - маса електрона, e - його заряд, r - радіус траєкторії електрона.

Пройшовши прискорюючу різницю потенціалів U, електрон матиме кінетичну енергію $\dfrac{m\upsilon^2}{2}$, яка рівна роботі A сил електричного поля:

$$\frac{m\upsilon^2}{2} = eU\ . \qquad (3)$$

З рівності (3) знаходимо швидкість електрона:

$$\upsilon = \sqrt{\frac{2eU}{m}} . \qquad (4)$$

З рівностей (2) і (4) знаходимо радіус траєкторії:

$$r = \frac{1}{B}\sqrt{\frac{2Um}{e}} \quad r = \frac{1}{10^{-2}}\sqrt{\frac{2\cdot 88\cdot 10^{3}\cdot 9{,}1\cdot 10^{-31}}{1{,}6\cdot 10^{-19}}} = 0{,}1\,\text{м}.$$

Задача 2. Соленоїд довжиною 20 см і діаметром 4 см має щільну трьохшарову обмотку з провідника діаметром 0,1 мм. По обмотці соленоїда проходить струм 0,1 А. Напруженості 3000 А/м відповідає індукція 1,7 Тл. Знайти магнітну проникність, індуктивність соленоїда, енергію і об'ємну густину енергії поля соленоїда.

Дано: $l = 0{,}2$ м, $D = 0{,}04$ м, $N = 3$, $d = 10^{-4}$ м, $I = 0{,}1$ А.

Знайти: $\mu, L, W, \omega - ?$

Поле всередині соленоїда можна вважати однорідним. Тоді напруженість поля:

$$H = In ,$$

де I - сила струму в обмотці, n - число витків, що припадає на одиницю довжини соленоїда, N - число шарів обмотки, d - діаметр провідника.

Тоді:

$$H = \frac{IN}{d} ; H = \frac{0{,}1A\cdot 3}{10^{-4}} = 3000 \text{ А/м}.$$

З графіка $B = f\left(H\right)$ знаходимо, що напруженості 3000 А/м відповідає індукція 1,7 Тл. Використовуючи зв'язок між індукцією і напруженістю:

$$B = \mu_0 \mu H$$

визначимо магнітну проникність:

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

$$\mu = \frac{1{,}7}{12{,}56\cdot 10^{-7}\cdot 3000} = 450 .$$

Індуктивність соленоїда визначається співвідношенням:

$$L = \mu_0 \mu n^2 l S ,$$

де l - довжина, S - площа поперечного перерізу соленоїда.

$$L = \mu_0 \mu \frac{N^2}{d^2} l \frac{\pi D^2}{4} . \text{ Тоді: } L = \frac{12{,}56\cdot 10^{-7}\cdot 450\cdot 3^2\cdot 0{,}2\cdot 3{,}14\cdot 4^2\cdot 10^{-4}}{4\cdot 1\cdot 10^{-8}} = 128\,\text{Гн}.$$

Об'ємна густина енергії магнітного поля:

$$w = \frac{BH}{2} ,$$

$$w = \frac{1{,}7 \cdot 3000}{2} = 2{,}55 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^3.$$

Енергія магнітного поля соленоїда:

$$W = \frac{LI^2}{2},$$

$$W = \frac{128 \cdot 1 \cdot 10^{-2}}{2} = 0{,}64 \text{ Дж}.$$

Задача 3. Виток радіусом 5 см із струмом 1 А вміщений в однорідне магнітне поле напруженістю 5000 А/м так, що нормаль до витка утворює кут 60º з напрямком поля. Яку роботу здійснюють сили поля при повертанні витка у стійке положення?

Дано: $r = 0{,}05$ м, $I = 1$ А, $H = 5000$ А/м, $\alpha = 60^\circ$.

Знайти: A - ?

Робота A при повертанні витка із струмом I в магнітному полі визначається:

$$A = I \cdot \Delta\Phi .$$

Тут $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ - зміна магнітного потоку крізь площину витка $S = \pi r^2$; $\Phi_1 = BS\cos\alpha$ - магнітний потік, що пронизує виток в початковому положенні, де α - кут між векторами нормалі $\vec{n}$ і індукції $\vec{B}$.

Стійким положенням витка в магнітному колі є таке положення, при якому напрям нормалі до нього співпадає з напрямком вектора індукції. Тоді $\cos\alpha = 1$. Отже, $\Phi_2 = BS$ і тоді:

$$\Delta\Phi = B\pi r^2 \left(1 - \cos\alpha\right).$$

Оскільки:

$$B = \mu_0 \mu H,$$

тому:

$$\Delta\Phi = \mu_0 \mu H \pi r^2 \left(1 - \cos\alpha\right).$$

Підставляючи вираз для $\Delta\Phi$ у вираз для A, отримаємо:

$$A = I \mu_0 \mu H \pi r^2 \left(1 - \cos\alpha\right).$$

$$A = 1 \cdot 12{,}56 \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 3{,}14 \cdot 25 \cdot 10^{-4} \left(1 - 0{,}5\right) = 2{,}46 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}.$$

Задачі для самостійного розв’язування

5.1. Електрон влітає в однорідне магнітне поле перпендикулярно до силових ліній. Швидкість електрона $4 \cdot 10^7$ м/с. Індукція магнітного поля 10^3 Тл. Чому дорівнює нормальне прискорення електрона в магнітному полі?

5.2. Частинка з енергію 16 МеВ, рухається в однорідному магнітному полі з індукцією 2,4 Тл по колу радіусом 24,5 см. Визначити заряд цієї частинки, якщо її швидкість $2{,}72 \cdot 10^3$ м/с.

5.3. Частинка, що несе елементарний заряд, влетіла в магнітне поле з індукцією 0,5 Тл. Визначити момент імпульсу частинки, що рухається в магнітному полі, якщо її траєкторія - дуга кола радіусом 0,1 см.

5.4. Провідник довжиною 20 см переміщують в однорідному магнітному полі з індукцією 0,1 Тл так, що його вісь складає кут 30° з напрямком поля. Як потрібно рухати провідник, щоб різниця потенціалів на його кінцях зростала рівномірно на 1 В за 1 с?

5.5. В однорідному магнітному полі, індукція якого 0,5 Тл, рівномірно рухається провідник довжиною 10 см. По провіднику тече струм 2 А. Швидкість руху провідника 20 см/с направлена перпендикулярно до вектора індукції. Знайти роботу переміщення провідника за 10с.

5.6. В однорідному магнітному полі з індукцією 0,4 Тл у площині, перпендикулярній до ліній індукції поля, обертається стержень довжиною 10 см. Вісь обертання проходить через один з його кінців. Визначити різницю потенціалів на кінцях стержня при частоті обертання 16 $с^{-1}$.

5.7. Електрон рухається в однорідному магнітному полі з індукцією 0,02 Тл по колу радіусом 1 см. Визначити кінетичну енергію електрона в джоулях і електрон-вольтах.

5.8. Електрон, енергія якого 300 еВ, рухається перпендикулярно до ліній індукції однорідного магнітного поля напруженістю 465 А/м. Визначити силу Лоренца, швидкість і радіус траєкторії електрона.

5.9. Протон, що пройшов прискорюючу різницю потенціалів 600 В, влетів в однорідне магнітне поле з індукцією 0,3 Тл і почав рухатись по колу. Обчислити радіус траєкторії протона.

5.10. Електрон і протон, прискорені однаковою різницею потенціалів, потрапляють в однорідне магнітне поле. Порівняти радіуси кривизни траєкторій протона та електрона. Маса протона в 1840 разів більша маси електрона.

5.11. По двох нескінченно довгих прямих паралельних провідниках в протилежних напрямках течуть струми силою 50 А та 100 А. Відстань між провідниками 20 см. Визначити магнітну індукцію у точці, віддаленій на відстані 25 см від першого і 40 см від другого провідника.

5.12. Напруженість магнітного поля в центрі колового витка радіусом 8 см дорівнює 30 А/м. Визначити напруженість на осі витка в точці, що знаходиться на відстані 6 см від центра витка.

5.13. По двох нескінченно довгих прямих провідниках, схрещених під прямим кутом, течуть струми силою 30 А і 40 А. Відстань між провідниками 20 см. Визначити магнітну індукцію у точці, яка рівновіддалена від обох провідників на відстань 20 см.

5.14. По довгому вертикальному проводу зверху вниз тече струм 8 А. На якій відстані від нього знаходиться точка, в якій напруженість магнітного поля, що є векторною сумою напруженостей магнітного поля Землі і поля струму, спрямована вертикально вгору? Горизонтальна складова магнітного поля Землі 16 А/м.

5.15. Визначити механічну потужність переміщення прямолінійного провідника довжиною 20 см зі швидкістю 5 м/с в однорідному магнітному полі, індукція якого 0,1 Тл. Кут між векторами $\vec{B}$ і $\vec{\upsilon}$ дорівнює π/2, а струм у провіднику 50 А.

5.16. Дротяний виток радіусом 5 см знаходиться в однорідному магнітному полі напруженістю 2 кА/м. Площина витка утворює кут 60° з вектором напруженості. По витку тече струм 4 А. Знайти механічний момент що діє на виток.

5.17. Прямий провідник довжиною 10 см, по якому тече струм 20 А, знаходиться в однорідному магнітному полі з індукцією 0,01 Тл. Знайти кут між напрямками вектора індукції і струму, якщо на провідник діє сила 10 мН.

5.18. Дротяний виток діаметром 20 см може обертатися навколо вертикальної осі, яка збігається з одним із діаметрів витка. Виток розташовано у площині магнітного меридіану. По ньому струм пропустили 10 А. Знайти механічний момент, який потрібно прикласти до витка, щоб він повернувся в початкове положення, складова магнітної індукції поля Землі 20 мкТл.

5.19. α – частинка, прискорена різницею потенціалів 1000 В, влетіла в однорідне магнітне поле, спрямоване перпендикулярно до швидкості частинки. Визначити напруженість магнітного поля, знаючи, що момент імпульсу частинки дорівнює 10^{21} кг·м^2/с.

5.20. Заряджена частинка пройшла прискорюючу різницю потенціалів 104 В і влетіла в схрещені під прямим кутом електричне 10 кВ/м і магнітне 0,1 Тл поля. Знайти питомий заряд частинки (відношення заряду до маси), якщо, рухаючись перпендикулярно до обох полів, частинка не відхиляється від прямолінійної траєкторії.

5.21. Електрон влітає в однорідне магнітне поле перпендикулярно до силових ліній. Швидкість електрона $4 \cdot 10^7$ м/с. Індукція магнітного поля 10^3 Тл. Чому дорівнює нормальне прискорення електрона в магнітному полі?

5.22. Частинка з енергію 16 МеВ, рухається в однорідному магнітному полі з індукцією 2,4 Тл по колу радіусом 24,5 см. Визначити заряд цієї частинки, якщо її швидкість $2{,}72 \cdot 10^3$ м/с.

5.23. Частинка, що несе елементарний заряд, влетіла в магнітне поле з індукцією 0,5 Тл. Визначити момент імпульсу частинки, що рухається в магнітному полі, якщо її траєкторія - дуга кола радіусом 0,1 см.

5.24. Провідник довжиною 20 см переміщують в однорідному магнітному полі з індукцією 0,1 Тл так, що його вісь складає кут 30° з напрямком поля. Як потрібно рухати провідник, щоб різниця потенціалів на його кінцях зростала рівномірно на 1 В за 1 с?

5.25. В однорідному магнітному полі, індукція якого 0,5 Тл, рівномірно рухається провідник довжиною 10 см. По провіднику тече струм 2 А. Швидкість руху провідника 20 см/с направлена перпендикулярно до вектора індукції. Знайти роботу переміщення провідника за 10с.

5.26. В однорідному магнітному полі з індукцією 0,4 Тл у площині, перпендикулярній до ліній індукції поля, обертається стержень довжиною 10 см. Вісь обертання проходить через один з його кінців. Визначити різницю потенціалів на кінцях стержня при частоті обертання 16 $с^{-1}$.

5.27. Електрон рухається в однорідному магнітному полі з індукцією 0,02 Тл по колу радіусом 1 см. Визначити кінетичну енергію електрона в джоулях і електрон-вольтах.

5.28. Електрон, енергія якого 300 еВ, рухається перпендикулярно до ліній індукції однорідного магнітного поля напруженістю 465 А/м. Визначити силу Лоренца, швидкість і радіус траєкторії електрона.

5.29. Протон, що пройшов прискорюючу різницю потенціалів 600 В, влетів в однорідне магнітне поле з індукцією 0,3 Тл і почав рухатись по колу. Обчислити радіус траєкторії протона.

5.30. Електрон і протон, прискорені однаковою різницею потенціалів, потрапляють в однорідне магнітне поле. Порівняти радіуси кривизни траєкторій протона та електрона. Маса протона в 1840 разів більша маси електрона.

РОЗДІЛ 6. КОЛИВАННЯ ТА ХВИЛІ

Основні закони і формули

Залежність координати від часу у гармонічних коливаннях	$x = A sin(\omega t + \varphi_0)$
Циклічна частота	$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$
Період коливань	$T = \frac{2\pi}{\omega}$
Швидкість коливної точки	$\upsilon = \frac{dx}{dt} = A\omega cos(\omega t + \varphi_0)$
Прискорення коливної точки	$a = \frac{d\upsilon}{dt} = -A\omega^2 sin(\omega t + \varphi_0)$
Зв'язок між силою і прискоренням для вільних гармонічних коливань матеріальної точки	$F_x = m a_x = -m A\omega_0^2 cos\left(\omega_0 t + \phi_0\right) =$ $= -m\omega_0^2 x = -k x$
Кінетична енергія матеріальної точки, що здійснює гармонічні коливання	$E_к = \frac{m\upsilon^2}{2} = \frac{1}{2} mA^2\omega^2 cos^2(\omega t + \varphi_0)$
Потенціальна енергія матеріальної точки, що здійснює гармонічні коливання	$E_п = \frac{kx^2}{2} = \frac{1}{2} kA^2 sin^2(\omega t + \varphi_0)$
Повна механічна енергія коливної точки	$E = E_к + E_п = \frac{1}{2} m\omega_0^2 A^2$
Період коливань математичного маятника	$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$
Період коливань пружинного маятника	$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$
Період коливань фізичного маятника	$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgl}}$
Амплітуда результуючого коливання, яке отримується при додаванні гармонічних коливань одного напряму	$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 cos(\varphi_2 - \varphi_1)$

Початкова фаза результуючого коливання, яке отримується при додаванні гармонічних коливань одного напряму	$tg\varphi = \dfrac{A_1 \sin\varphi_1 + A_2 \sin\varphi_2}{A_1 \cos\varphi_1 + A_2 \cos\varphi_2}$
Траєкторія руху матеріальної точки, яка бере участь у двох взаємно перпендикулярних коливаннях	$\dfrac{x^2}{A_1^2} + \dfrac{y^2}{A_2^2} - 2\dfrac{x}{A_1}\dfrac{y}{A_2}\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1)$
Залежність координати від часу у згасаючих коливаннях	$x = A_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi_0)$
Період власних електромагнітних коливань, які виникають у контурі	$T = 2\pi\sqrt{LC}$
Рівняння біжучої хвилі	$S = A\sin(\omega t - kx + \varphi_0)$
Кінетична енергія пружної хвилі	$\Delta W_к = \dfrac{1}{2}\rho A^2\omega^2 \,\Delta V \cos^2(\omega t - kx + \varphi_0)$
Потенціальна енергія пружної хвилі	$\Delta W_П = \dfrac{1}{2}\rho A^2\omega^2 \,\Delta V \cos^2(\omega t - kx + \varphi_0)$
Повна енергія пружної хвилі	$\Delta W = \rho A^2\omega^2 \,\Delta V \cos^2(\omega t - kx + \varphi_0)$
Швидкість електромагнітної хвилі	$\upsilon = \dfrac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon \mu_0 \mu}}$
Рівняння коливань вектора $\vec{E}$ електромагнітної хвилі	$E = E_0 \sin(\omega t - kx + \varphi_0)$
Рівняння коливань вектора $\vec{H}$ електромагнітної хвилі	$H = H_0 \sin(\omega t - kx + \varphi_0)$
Вектор потоку електромагнітної енергії	$\vec{P} = \left[\vec{E}\vec{H}\right]$

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Камертон коливається з частотою $v_0 = 800$ Гц і амплітудою $A = 4$ мм. Знайти максимальне прискорення його гілки, що коливається.

Дано: $v_0 = 800$ Гц, $A = 4$ мм.

Знайти: $a_{max} - ?$

Рівняння руху гілки камертона має вигляд (у системі СІ):

$$x = A\sin\left(2\pi v_0 t + \varphi\right) = 0{,}004\sin\left(2\pi 800 t + \varphi\right). \qquad (1)$$

Початкова фаза нам не відома, але її значення може бути довільним. За формулою для прискорення:

$$a = \frac{dx}{dt} = -\left(1600\pi\right)^2 0{,}004\,sin\left(1600t + \varphi\right). \qquad (2)$$

Максимальне значення прискорення відповідає тим моментам часу, коли значення синуса, що входить до формули (2), дорівнює +1 або -1, оскільки істотним є абсолютне значення прискорення.

При цьому за абсолютною величиною:

$$a_{max} = \left(1600\pi\right)^2 0{,}004 \approx 10^5 \text{ м/с}^2.$$

Задача 2. За час $\Delta t = 8$ хв амплітуда коливань маятника зменшилась у три рази. Визначити коефіцієнт згасання β.

Дано: $\Delta t = 8$ хв, $\dfrac{A(t)}{A(t+\Delta t)} = 3$.

Знайти: $\beta - ?$

Залежність амплітуди згасаючих коливань від часу подається співвідношенням:

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

Відношення амплітуд через проміжок часу Δt:

$$\frac{A(t)}{A(t+\Delta t)} = \frac{A_0 e^{-\beta t}}{A_0 e^{-\beta(t+\Delta t)}} = \frac{1}{e^{-\beta\Delta t}} = e^{\beta\Delta t} = 3.$$

Коефіцієнт β знайдемо, прологарифмувавши останню рівність:

$$\beta\Delta t = ln3;$$

$$\beta = \frac{ln3}{\Delta t}.$$

Обчислимо: $\beta = 0{,}0046$ с$^{-1}$.

Задача 3. Поперечна хвиля поширюється вздовж пружного шнура зі швидкістю $\upsilon = 15$ м/с. Період коливань точок шнура $T = 1{,}2$ с, амплітуда $A = 2$ м. Визначити а) довжину хвилі λ; б) фазу коливань, зміщення і швидкість точки середовища, яка знаходиться на відстані $x = 45$ м від джерела хвиль в момент часу $t = 4$ с; в) різницю фаз коливань двох точок, які лежать на промені і віддалені від джерела хвиль на $x_1 = 20$ м і $x_2 = 30$ м.

Дано: $\upsilon = 15$ м/с, $T = 1{,}2$ с, $A = 2$ м, $x = 45$ м, $t = 4$ с, $x_1 = 20$ м, $x_2 = 30$ м.

Знайти: λ, φ, $\Delta\varphi$ $-?$

Довжина хвилі дорівнює відстані, яку хвиля проходить за один період, і може бути знайдена зі співвідношення:

$$\lambda = \upsilon T .$$

Підставивши значення величин υ і T отримаємо $\lambda = 18$ м.

Запишемо рівняння хвилі:

$$S = A\cos\omega\left(t - x/\upsilon\right),$$

де S - зміщення точки, що коливається, x - відстань точки від джерела хвиль, υ - швидкість поширення хвиль.

Фаза коливань точки з координатою x в момент часу t визначається виразом, який стоїть під знаком косинуса:

$$\varphi = \omega\left(t - \frac{x}{\upsilon}\right), \text{ або } \varphi = \frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{x}{\upsilon}\right),$$

де враховано, що $\omega = \dfrac{2\pi}{T}$.

Провівши обчислення за останньою формулою, одержимо:

$$\varphi = 5{,}24 \text{ рад, або } \varphi = 300° .$$

Зміщення визначимо, підставивши у рівняння плоскої хвилі значення амплітуди і фази:

$$S = 0{,}01 \text{ м.}$$

Швидкість точки знаходимо, взявши першу похідну від зміщення по часу:

$$\upsilon = \frac{dS}{dt} = -A\omega \sin\omega\left(t - \frac{x}{\upsilon}\right) = -\frac{2\pi A}{T}\sin\omega\left(t - \frac{x}{\upsilon}\right) = \frac{2\pi A}{T}\sin\varphi .$$

Підставивши значення величин π, A, T, φ і провівши обчислення, отримаємо: $\upsilon = 0{,}09$ м/с.

Різниця фаз коливань двох точок хвилі зв'язана з відстанню Δx між цими точками співвідношенням:

$$\Delta\varphi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)\Delta x = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)\left(x_2 - x_1\right).$$

Підставивши значення величин λ, x_1 і x_2 та обчисливши, одержимо:

$$\Delta\varphi = 3{,}49 \text{ рад, або } \Delta\varphi = 200° .$$

Задачі для самостійного розв’язування

6.1. Матеріальна точка бере участь одночасно у двох взаємно перпендикулярних коливаннях: $x = \sin \pi t$ м і $y = 2\sin(\pi t + \frac{\pi}{2})$ м. Знайти траєкторію руху точки і накреслити її у зручному масштабі.

6.2. Математичний маятник довжиною в 24,7 см виконує згасаючі коливання. Через скільки часу енергія коливань маятника зменшиться у 9,4 рази? Задачу розв'язати при значенні логарифмічного декремента згасання: 1) λ = 0,01; 2) λ =1. Зобразити дані коливальні рухи графічно.

6.3. Логарифмічний декремент згасання математичного маятника дорівнює 0,2. Знайти, у скільки разів зменшиться амплітуда коливань за одне повне коливання маятника. Зобразити даний коливальний рух графічно.

6.4. Чому дорівнює логарифмічний декремент згасання математичного маятника, якщо за 1хв амплітуда коливань зменшилася у два рази? Довжина маятника 1м. Зобразити даний коливальний рух графічно.

6.5. Період згасаючих коливань 4 с, логарифмічний декремент згасання 1,6, початкова фаза рівна нулю. Зміщення точки від положення рівноваги при $t = \frac{T}{4}$ дорівнює 4,5 см. Написати рівняння руху цього коливання. Зобразити даний коливальний рух графічно.

6.6. Амплітуда загасаючих коливань математичного маятника за 1 хв зменшилася вдвічі. У скільки разів вона зменшиться за 3 хв. Зобразити даний коливальний рух графічно.

6.7. Математичний маятник довжиною 0,5 м, виведений з положення рівноваги, відхилився при першому коливанні на 5 см, а при другому (у ту ж сторону) - на 4 см. Знайти час релаксації, тобто час, протягом якого амплітуда коливань зменшиться в *e* разів, де *e* - основа натурального логарифма. Зобразити даний коливальний рух графічно.

6.8. Амплітуда зміни заряду конденсатора в коливальному контурі рівна 10 мкКл. Який вигляд має рівняння зміни сили струму в контурі, якщо ємність конденсатора 10 мкФ, а індуктивність котушки 0,1 Гн? Зобразити даний коливальний рух графічно.

6.9. Визначити циклічну частоту коливань в електричному коливальному контурі, якщо максимальна сила струму в котушці індуктивності 1 А, максимальна різниця потенціалів на обкладках конденсатора 300 В, а енергія контура 0,15 мДж. Зобразити даний коливальний рух графічно.

6.10. Через 0,25 мкс після включення коливального контуру енергія магнітного поля котушки стала рівною енергії електричного поля конденсатора. Визначити частоту коливань, що виникають у контурі, якщо струм у котушці індуктивності змінюється за законом $I = I_0 \sin \omega t$. Зобразити даний коливальний рух графічно.

6.11. Написати рівняння гармонічного коливального руху з амплітудою 5 см, якщо за 1 хв відбувається 150 коливань і початкова фаза коливань дорівнює 45°. Накреслити графік цього руху.

6.12. Амплітуда гармонічних коливань дорівнює 50 мм, період 4 с і початкова фаза $\pi/4$. Написати рівняння цього коливання.

Зайти зміщення коливної точки від положення рівноваги в моменти часу t=0 і t=1,5 с. Накреслити графік цього руху.

6.13. Знайти амплітуду і початкову фазу гармонічного коливання, отриманого від додавання однаково направлених коливань, заданих рівняннями: $x_1 = 4 sin \pi t$ см і $x_2 = 3 sin(\pi t + \frac{\pi}{2})$ см. Написати рівняння результуючого коливання. Подати векторну діаграму додавання амплітуд.

6.14. Дано два гармонічних коливання: $x_1 = 3 sin 4\pi t$ см і $x_2 = 6 sin 10\pi t$ см. Побудувати графіки цих коливань. Склавши графічно ці коливання, побудувати графік результуючого коливання.

6.15. Тіло масою 5 г здійснює коливання, що описується рівнянням $x=Asin(\omega t + \varphi_0)$. Побудувати графіки залежності кінетичної, потенціальної та повної енергії тіла від часу. A = 2 см, T = 0,5 с, φ_0 = 30^0.

6.16. Тіло масою 7 г здійснює коливання, що описується рівнянням $x=Asin(\omega t + \varphi_0)$. Побудувати графіки залежності кінетичної, потенціальної та повної енергії тіла від часу. A = 3 см, T = 1,5 с, φ_0 = 60^0.

6.17. Тіло масою 10 г здійснює коливання, що описується рівнянням $x=Asin(\omega t + \varphi_0)$. Побудувати графіки залежності кінетичної, потенціальної та повної енергії тіла від часу. A = 5 см, T = 2,5 с, φ_0 = 45^0.

6.18. Точка бере участь одночасно в двох взаємно перпендикулярних коливаннях $x = 2\sin\omega t$ м і $y = 2\cos\omega t$ м Знайти траєкторію руху точки.

6.19. Точка бере участь у двох коливаннях однакового періоду з однаковими початковими фазами. Амплітуди коливань: A_1 = 3 см і A_2 = 4 см. Знайти амплітуду результуючого коливання, якщо: 1) коливання відбуваються в одному напрямку; 2) коливання взаємно перпендикулярні. Зобразити дані коливальні рухи графічно.

6.20. Точка бере участь одночасно у двох взаємно перпендикулярних коливаннях: $x = 2 sin \omega t$ м та $y = 2 cos \omega t$ м. Знайти траєкторію руху коливної точки і накреслити її у зручному масштабі.

6.21. Матеріальна точка бере участь одночасно у двох взаємно перпендикулярних коливаннях: $x = sin \pi t$ м і $y = 2 sin(\pi t + \frac{\pi}{2})$ м. Знайти траєкторію руху точки і накреслити її у зручному масштабі.

6.22. Математичний маятник довжиною в 24,7 см виконує згасаючі коливання. Через скільки часу енергія коливань маятника зменшиться у 9,4 рази? Задачу розв’язати при значенні логарифмічного декремента згасання: 1) λ = 0,01; 2) λ =1. Зобразити дані коливальні рухи графічно.

6.23. Логарифмічний декремент згасання математичного маятника дорівнює 0,2. Знайти, у скільки разів зменшиться амплітуда коливань за одне повне коливання маятника. Зобразити даний коливальний рух графічно.

6.24. Чому дорівнює логарифмічний декремент згасання математичного маятника, якщо за 1хв амплітуда коливань зменшилася у два рази? Довжина маятника 1м. Зобразити даний коливальний рух графічно.

6.25. Період згасаючих коливань 4 с, логарифмічний декремент згасання 1,6, початкова фаза рівна нулю. Зміщення точки від положення рівноваги при $t = \frac{T}{4}$ дорівнює 4,5 см. Написати рівняння руху цього коливання. Зобразити даний коливальний рух графічно.

6.26. Амплітуда загасаючих коливань математичного маятника за 1 хв зменшилася вдвічі. У скільки разів вона зменшиться за 3 хв. Зобразити даний коливальний рух графічно.

6.27. Математичний маятник довжиною 0,5 м, виведений з положення рівноваги, відхилився при першому коливанні на 5 см, а при другому (у ту ж сторону) - на 4 см. Знайти час релаксації, тобто час, протягом якого амплітуда коливань зменшиться в *e* разів, де *e* - основа натурального логарифма. Зобразити даний коливальний рух графічно.

6.28. Амплітуда зміни заряду конденсатора в коливальному контурі рівна 10 мкКл. Який вигляд має рівняння зміни сили струму в контурі, якщо ємність конденсатора 10 мкФ, а індуктивність котушки 0,1 Гн? Зобразити даний коливальний рух графічно.

6.29. Визначити циклічну частоту коливань в електричному коливальному контурі, якщо максимальна сила струму в котушці індуктивності 1 А, максимальна різниця потенціалів на обкладках конденсатора 300 В, а енергія контура 0,15 мДж. Зобразити даний коливальний рух графічно.

6.30. Через 0,25 мкс після включення коливального контуру енергія магнітного поля котушки стала рівною енергії електричного поля конденсатора. Визначити частоту коливань, що виникають у контурі, якщо струм у котушці індуктивності змінюється за законом $I = I_0 \sin \omega t$. Зобразити даний коливальний рух графічно.

РОЗДІЛ 7. ХВИЛЬОВА ОПТИКА ТА КВАНТОВА ПРИРОДА ВИПРОМІНЮВАННЯ

Основні закони і формули

Умова максимального підсилення світла при інтерференції	$\Delta = \pm k\lambda$ $(k = 1,2,3,...)$
Умова максимального послаблення світла при інтерференції	$\Delta = \pm(2k+1)\lambda / 2$ $(k = 1,2,3,...)$
Ширина інтерференційної смуги	$\Delta x = \frac{L}{d}\lambda$
Оптична різниця ходу у відбитому світлі в тонкій плівці	$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - sin^2 i} + \lambda / 2$ $\Delta = 2dn\,cos\,r + \lambda / 2$
Радіус світлих кілець Ньютона у відбитому світлі	$r_k = \sqrt{(2k-1)R\frac{\lambda}{2}}$, $(k = 1,2,3,...)$,
Радіус темних кілець у відбитому світлі	$r_k = \sqrt{kR\lambda}$, $(k = 1,2,3,...)$
Радіус зон Френеля для сферичної хвильової поверхні	$r_k = \sqrt{\frac{Rb}{R+b}k\lambda}$
Радіус зон Френеля для плоского фронту хвилі	$r_k = \sqrt{kb\lambda}$
Умова максимуму при дифракції на одній щілині	$a\,sin\varphi = \pm(2k+1)\lambda / 2$
Умова мінімуму при дифракції на одній щілині	$a\,sin\varphi = \pm 2k\frac{\lambda}{2}$
Умова максимуму при дифракції на дифракційній гратці	$d\,sin\varphi = \pm 2k\frac{\lambda}{2}$
Умова мінімуму при дифракції на дифракційній гратці	$d\,sin\varphi = \pm(2k+1)\lambda / 2$
Роздільна здатність дифракційної решітки	$R = \lambda / \Delta\lambda = kN$
Формула Вульфа-Бреггів	$2d\,sin\theta = k\lambda$
Закон Брюстера	$tgi = n_{2,1}$
Закон Малюса	$I = I_0\,cos^2\varphi$
Кут повороту площини поляризації в розчинах	$\varphi = \alpha Cd$

Закон Стефана-Больцмана	$R^* = \sigma T^4$, σ =5,67·10^{-8} Вт/(м$^{-2}$·К^4)
Закон зміщення Віна	$\lambda_{max} = \dfrac{b}{T}$
Формула Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту	$h\nu = A + \dfrac{m\upsilon^2}{2}$
Формула Комптона	$\Delta\lambda = \dfrac{2h}{m_0 c} sin^2 \dfrac{\theta}{2}$, або $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \dfrac{h}{m_0 c}\left(1 - cos\,\theta\right)$
Тиск світла	$p = \dfrac{I}{c}(1-\rho)$, $I = \dfrac{Nh\nu}{S}$

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Для усунення відбивання світла від поверхні лінзи на неї наноситься тонка плівка речовини з показником заломлення 1,25, меншим, ніж у скла (просвітлена оптика). При якій найменшій товщині плівки відбивання світла з довжиною хвилі 0,72 мкм не буде спостерігатися, якщо кут падіння променів 60°?

Дано: $n = 1{,}25$, $\lambda = 0{,}72$ мкм, i =60°

Знайти: $d_{min} - ?$

Оптична різниця ходу променів, відбитих від нижньої і верхньої поверхонь плівки:

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - sin^2 i}\ . \qquad (1)$$

У виразі (1) враховано, що відбивання променів на обох поверхнях походить від оптично більш щільного середовища і тому втрати півхвилі в обох випадках компенсують один одного. Умова інтерференційного мінімуму:

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

Підставляючи (1) у (2), одержуємо:

$$2d\sqrt{n^2 - sin^2 i} = (2k-1)\frac{\lambda}{2}\ . \qquad (3)$$

З (3) знайдемо можливі значення товщини плівки:

$$d = \frac{(2k-1)\lambda}{4\sqrt{n^2 - sin^2 i}}\ . \qquad (4)$$

Найменша товщина плівки спостерігається при k=1:

$$d_{min} = \frac{\lambda}{4\sqrt{n^2 - sin^2 i}},$$

$$d_{min} = \frac{0,75 \cdot 10^{-6}}{4\sqrt{1,25^2 - sin^2 60°}} = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

Задача 2. Постійна дифракційної ґратки 10 мкм, її ширина 2 см. У спектрі якого порядку ця ґратка може розділити дублет λ_1=486,0 нм і λ_2=486,1 нм?

Дано: $d = 10$ мкм, l =2 см, $\lambda = 0,72$ мкм, λ_1=486,0 нм, λ_2=486,1 нм

Знайти: $k - ?$

Роздільна здатність дифракційної ґратки:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = kN, \tag{1}$$

де $\Delta\lambda$ - мінімальна різниця довжин хвиль двох спектральних ліній λ і $\lambda + \Delta\lambda$, що розділяються ґраткою; k - порядок спектра; N - число щілин ґратки. Тому що постійна ґратки d є відстань між серединами сусідніх щілин, тоді:

$$N = \frac{l}{d}, \tag{2}$$

де l - ширина ґратки. З формули (1) з урахуванням (2) знаходимо:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{kN} = \frac{d\lambda}{kl}. \tag{3}$$

Дублет спектральних ліній λ_1 і λ_2 буде розділятися, якщо:

$$\Delta\lambda \le \lambda_2 - \lambda_1. \tag{4}$$

Підставляючи (3) у (4), з урахуванням того, що $\lambda = \lambda_1$ одержуємо:

$$\frac{d\lambda_1}{kl} \le \lambda_2 - \lambda_1. \tag{5}$$

З виразу (5) випливає, що дублет λ_1 і λ_2 буде дозволений у всіх спектрах з порядком:

$$k \ge \frac{d\lambda_1}{l(\lambda_2 - \lambda_1)}.$$

Проводячи обчислення, одержуємо:

$$k \ge \frac{10 \cdot 10^{-6} \cdot 486,0 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 10^{-2} \cdot (486,1 - 486,0) \cdot 10^{-9}} = 2,43$$

Враховуючи, що k повинно бути цілим числом, вважаємо $k \ge 3$

Задача 3. Інтенсивність природного світла, що пройшло через поляризатор, зменшилася в 2,3 рази. В скількох разів вона зменшиться, якщо за першим поставити другий такий же поляризатор так, щоб кут між їх головними площинами був рівний 60º?

Дано: $\frac{I_0}{I_1} = 2{,}3,\ \alpha = 60^o$

Знайти: $\frac{I_0}{I_2} - ?$

Природне світло можна представити, як накладання двох некогерентних хвиль, поляризованих у взаємно перпендикулярних площинах і які мають однакові інтенсивності. Ідеальний поляризатор пропускає коливання, паралельні його головній площині, і повністю затримує коливання, які перпендикулярні до цієї площини. На виході з першого поляризатора одержується плоскополяризоване світло, інтенсивність якого з урахуванням втрат на відбивання і поглинання світла поляризатором дорівнює:

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

де I_0 - інтенсивність природного світла; k - коефіцієнт, що враховує втрати на відображення і поглинання. Після проходження другого поляризатора інтенсивність світла зменшується як за рахунок відбивання і поглинання світла поляризатором, так і через неспівпадіння площини поляризації світла з головною площиною поляризатора. Відповідно до закону Малюса і з урахуванням втрат на відбивання і поглинання світла, ця інтенсивність дорівнює:

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

де α - кут між площиною поляризації світла, що паралельна головній площині першого поляризатора, і головною площиною другого поляризатора. Знайдемо в скільки разів зменшилася інтенсивність світла:

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{I_0}{I_1\left(1 - k\right)cos^2\alpha}\ . \qquad (3)$$

З виразу (1) знайдемо:

$$\left(1 - k\right) = \frac{2I_1}{I_0}, \qquad (4)$$

Підставляючи (4) в (3), отримаємо:

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{1}{2cos^2\alpha}\left(\frac{I_0}{I_1}\right)^2 .$$

Обчислимо:

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{1}{2cos^2 60^0}\left(2{,}3\right)^2 = 10{,}6$$

Задача 4. Довжина хвилі, на яку припадає максимум енергії у спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла, $\lambda_{max} = 0{,}58$ мкм. Визначити енергетичну світність R^* поверхні тіла.

Дано: $\lambda_{max} = 0{,}58$ мкм

Знайти: $R^* - ?$

Енергетична світність R^* абсолютно чорного тіла у відповідності з законом Стефана-Больцмана пропорційна четвертій степені термодинамічної температури та виражається формулою:

$$R^* = \sigma T^4, \qquad (1)$$

де σ - стала Стефана-Больцмана; T - термодинамічна температура.

Температуру T можна обчислити за допомогою закону зміщення Віна:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}, \qquad (2)$$

де b - постійна Віна.

Використовуючи формули (2) та (1), отримаємо:

$$R^* = \sigma \left(\frac{b}{\lambda_{max}} \right)^4. \qquad (3)$$

Обчислимо вираз:

$$R^* = 5{,}67 \cdot 10^{-8} \left(\frac{2{,}90 \cdot 10^{-3}}{5{,}8 \cdot 10^{-7}} \right)^4 = = 3{,}54 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2.$$

Задача 7. В результаті ефекту Комптона фотон при співударі з електроном був розсіяний на кут $\theta = 90^\circ$. Енергія розсіяного фотона $\varepsilon_2 = 0{,}4$ МеВ. Визначити енергію фотона ε_1 до розсіювання.

Дано: $\theta = 90^\circ$, $\varepsilon_2 = 0{,}4$ МеВ

Знайти: $\varepsilon_1 - ?$

Для визначення енергії первинного фотона використаємо формулу Комптона:

$$\Delta\lambda = 2 \frac{h}{m_0 c} sin^2 \frac{\theta}{2}. \qquad)$$

де $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ - зміна довжини хвилі фотона в результаті розсіяння на вільному електроні; h - стала Планка; m_0 - маса спокою електрона; c - швидкість світла у вакуумі; θ - кут розсіяння фотона.

Перетворимо формулу (1):

1) замінимо у ній $\Delta\lambda$ на $\lambda_2 - \lambda_1$;

2)виразимо довжини хвиль λ_1 та λ_2 через енергії ε_1 та ε_2 відповідних фотонів, скориставшись формулою $\varepsilon = \frac{hc}{\lambda}$;

3) помножимо чисельник та знаменник правої частини на c. Тоді

$$\frac{hc}{\varepsilon_2} - \frac{hc}{\varepsilon_1} = \frac{hc}{m_0 c^2} 2\, sin^2 \frac{\theta}{2}.$$

Скоротимо на hc та виразимо з цієї формули шукану енергію:

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_2 m_0 c^2}{m_0 c^2 - \varepsilon_2 2\, sin^2(\theta/2)} = \frac{\varepsilon_2 E_0}{E_0 - 2\varepsilon_2\, sin^2(\theta/2)}, \qquad (2)$$

де $E_0 = m_0 c^2$ - енергія спокою електрона.

Так як для електрона $E_0 = 0{,}511$ МеВ, то

$$\varepsilon_1 = \frac{0{,}4 \cdot 0{,}511}{0{,}511 - 2 \cdot 0{,}4\, sin^2(90°/2)} = 1{,}85 \text{ МеВ}.$$

Задачі для самостійного розв'язування

7.1. Дифракційна ґратка містить 200 штрихів на 1 мм. На ґратку падає нормально монохроматичне світло (λ =0,6 мкм). Максимум якого найбільшого порядку дає ця ґратка?

7.2. На грань кристалу кам'яної солі падає паралельний пучок рентгенівського випромінювання (λ =147 пм). Визначити відстань між атомними площинами кристалу, якщо дифракційний максимум 2-го порядку спостерігається, коли випромінювання падає під кутом θ =31°30′ до поверхні кристалу.

7.3. На дифракційну ґратку, що містить 400 штрихів на 1 мм, падає нормально монохроматичне світло (λ =0,5 мкм). Знайти загальне число дифракційних максимумів, які дає ця ґратка.

7.4. Паралельній пучок рентгенівського випромінювання падає на грань кристалу. Під кутом θ =65° до площини грані спостерігається максимум першого порядку. Відстань d між атомними площинами кристалу 280 пм. Визначити довжину хвилі λ рентгенівського випромінювання.

7.5. Промінь природного світла послідовно проходить через поляризатор і аналізатор, кут між головними площинами яких 60°. Яка частина початкового потоку вийде з аналізатора?

7.6. Кут між головними площинами поляризатора й аналізатора 45° У скільки разів зменшиться інтенсивність світла, що виходить з аналізатора, якщо кут збільшити до 60°?

7.7. Визначити червону межу фотоефекту для цинку і максимальну швидкість фотоелектронів, що вириваються з його поверхні електромагнітним випромінюваннями, довжина хвилі якого становить λ =250 нм.

7.8. При фотоефекті з платинової поверхні електрони повністю затримуються різницею потенціалів 0,8 В. Знайти довжину хвилі λ випромінювання і граничну довжину хвилі λ_0, при якій ще можливий фотоефект.

7.9. Визначити кут θ розсіяння фотона, який зазнав зіткнення з вільним електроном (комптон-ефект), якщо зміна довжини хвилі $\Delta\lambda$, при розсіянні дорівнює. 3,62 пм.

7.10. Фотон з енергією ε =0,75 МеВ розсіявся на вільному електроні під кутом φ =45°. Знайти енергію розсіяного фотона ε', кінетичну енергію E_k та імпульс p електрона віддачі.

7.11. Відстань d між двома когерентними джерелами світла (λ =0,5 мкм) дорівнює 0,1 мм. Відстань b між інтерференційними смугами на екрані в середній частині інтерференційної картини дорівнює 1 см. Визначити відстань L від джерела до екрану.

7.12. На діафрагму з двома вузькими щілинами, що знаходяться на відстані d =2,5 мм падає нормально монохроматичне світло. Інтерференційна картина утворюється на екрані, віддаленому від діафрагми на відстань l =100 см. Куди і на яку відстань змістяться інтерференційні смуги, якщо одну з щілин затулити скляною пластинкою товщиною h =1 мкм і показником заломлення n =1,5?

7.13. Визначити радіус 4-го темного кільця Ньютона, якщо між лінзою радіусом кривизни R =5 м і плоскою поверхнею, до якої вона притиснена, знаходиться вода. Довжина хвилі світла λ =589 нм.

7.14. Для спостереження кілець Ньютона використовують плоско-опуклу лінзу з радіусом кривизни R =160 см. Визначити радіуси 4-го і 9-го темних кілець у відбитому світлі, якщо система освітлюється монохроматичним світлом з довжиною хвилі λ =625 нм.

7.15. Пучок монохроматичних світлових хвиль падає під кутом i =30° на мильну плівку (n =1,3), яка міститься в повітрі. При якій найменшій товщині d плівки відбиті світлові хвилі будуть максимально ослаблені інтерференцією; максимально підсилені?

7.16. Діаметр d_2 другого світлого кільця Ньютона при спостереженні у відбитому світлі (λ =0,6 мкм) дорівнює 1,2 мм. Визначити радіус кривизни плоско-опуклої лінзи, взятої для досліду.

7.17. Плоско-опукла лінза з радіусом кривизни R =0,5 м опуклою стороною лежить на скляній пластинці. Радіус r_4 четвертого темного кільця Ньютона у прохідному світлі дорівнює 0,7 мм. Визначити довжину світлової хвилі.

7.18. Під кутом α =30° спостерігається 4-й дифракційний максимум для довжини хвилі λ =0,644 мкм. Визначити постійну дифракційної ґратки і її ширину, якщо вона дозволяє розділити $\Delta\lambda$ =0,322 нм.

7.19. На дифракційну ґратку, що містить 100 штрихів на 1 мм, падає нормально монохроматичне світло. Зорову трубу спектрометра наведено на максимум третього порядку. Щоб навести трубу на інший максимум цього ж порядку її потрібно повернути на кут $\Delta\varphi$ =20°. Визначити довжину хвилі λ світла.

7.20. Дифракційна ґратка освітлена монохроматичним світлом, яке падає нормально. В дифракційній картині максимум другого порядку відхилений на кут φ_1=14°. На який кут φ_2 відхилений максимум третього порядку?

7.21. Дифракційна ґратка містить 200 штрихів на 1 мм. На ґратку падає нормально монохроматичне світло (λ =0,6 мкм). Максимум якого найбільшого порядку дає ця ґратка?

7.22. На грань кристалу кам'яної солі падає паралельний пучок рентгенівського випромінювання (λ =147 пм). Визначити відстань між атомними площинами кристалу, якщо дифракційний максимум 2-го порядку спостерігається, коли випромінювання падає під кутом θ =31°30′ до поверхні кристалу.

7.23. На дифракційну ґратку, що містить 400 штрихів на 1 мм, падає нормально монохроматичне світло (λ =0,5 мкм). Знайти загальне число дифракційних максимумів, які дає ця ґратка.

7.24. Паралельній пучок рентгенівського випромінювання падає на грань кристалу. Під кутом θ =65° до площини грані спостерігається максимум першого порядку. Відстань d між атомними площинами кристалу 280 пм. Визначити довжину хвилі λ рентгенівського випромінювання.

7.25. Промінь природного світла послідовно проходить через поляризатор і аналізатор, кут між головними площинами яких 60°. Яка частина початкового потоку вийде з аналізатора?

7.26. Кут між головними площинами поляризатора й аналізатора 45° У скільки разів зменшиться інтенсивність світла, що виходить з аналізатора, якщо кут збільшити до 60°?

7.27. Визначити червону межу фотоефекту для цинку і максимальну швидкість фотоелектронів, що вириваються з його поверхні електромагнітним випромінюваннями, довжина хвилі якого становить λ =250 нм.

7.28. При фотоефекті з платинової поверхні електрони повністю затримуються різницею потенціалів 0,8 В. Знайти довжину хвилі λ випромінювання і граничну довжину хвилі λ_0, при якій ще можливий фотоефект.

7.29. Визначити кут θ розсіяння фотона, який зазнав зіткнення з вільним електроном (комптон-ефект), якщо зміна довжини хвилі $\Delta\lambda$, при розсіянні дорівнює. 3,62 пм.

7.30. Фотон з енергією ε =0,75 МеВ розсіявся на вільному електроні під кутом φ =45°. Знайти енергію розсіяного фотона ε', кінетичну енергію E_k та імпульс p електрона віддачі.

РОЗДІЛ 8. АТОМНА ТА ЯДЕРНА ФІЗИКА

Основні закони і формули

Загальна формула серій випромінювання воднево подібних систем	$\frac{1}{\lambda} = RZ^2\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)$ $n_2 = n_1 + 1; n_1 + 2; n_1 + 3; \ldots$
Енергія фотона	$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda} = R' Z^2 hc\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)$ $R = R' c = 1{,}097 \cdot 10^7 c$
Енергія іонізації	$\varepsilon_i = R' hc = 13{,}6 \cdot Z^2 eB$
Повна енергія електрона	$E = E_K + E_П = -\frac{1}{n^2}\frac{Z^2 me^4}{8h^2\varepsilon_0^2}$ $n = 1,2,3,\ldots$
Радіус орбіти	$r_n = n^2 \frac{4\pi\varepsilon_0\hbar^2}{me^2}$
Довжина хвилі де Бройля	$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m\upsilon}$
Імпульс нерелятивістський	$p = \sqrt{2m_0 E_K}$; $E_K = \frac{m\upsilon^2}{2} = \frac{p^2}{2m}$
Імпульс релятивістський	$p = \frac{1}{c}\sqrt{E_K\left(E_K + 2E_0\right)}$; $E_0 = m_0 c^2$
Співвідношення невизначеностей Гейзенберга	$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar = \frac{h}{2\pi}$, або $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$
Густина ймовірності виявлення частинки в потенціальній ямі	$\omega = \lvert\psi\rvert^2 = \left(\sqrt{\frac{2}{l}} sin \frac{n\pi}{l} x\right)^2$
Хвильова функція, що описує стан мікрочастинки в нескінченно глибокій одновимірній потенціальній ямі шириною l	$\psi_n = \sqrt{\frac{2}{l}} sin \frac{n\pi \cdot x}{l}$
Повна енергія мікрочастинки в потенціальній ямі шириною l	$E = n^2 \frac{h^2}{8ml^2}$; $n = 1,2,3,\ldots$
Квантування орбітального моменту імпульсу електрона	$L_l = \hbar\sqrt{l(l+1)}$

Квантування спінового моменту імпульсу (спіну) електрона	$L_S = \hbar\sqrt{s(s+1)}$
Орбітальний магнітний момент електрона	$\mu_l = \mu_Б\sqrt{l(l+1)}$
Спіновий магнітний момент електрона	$\mu_S = 2\mu_Б\sqrt{s(s+1)}$
Короткохвильова межа рентгенівського випромінювання	$\lambda_{min} = \dfrac{hc}{eU}$
Закон Мозлі	$\dfrac{1}{\lambda} = R(Z-\sigma)^2\left(\dfrac{1}{n^2}-\dfrac{1}{m^2}\right)$
Закон радіоактивного розпаду	$N = N_0e^{-\lambda t}$; $N_0 = \dfrac{m}{M}N_A$
Період напіврозпаду	$T = \dfrac{ln2}{\lambda}$
Середній час життя радіоактивного нукліда	$\tau = \dfrac{1}{\lambda}$
Активність радіоактивної речовини	$a = a_0e^{-\lambda T}$; $a_0 = \lambda N_0$
Закон поглинання гама-випромінювання речовиною	$I = I_0e^{-\mu\cdot x}$
Дефект маси атомного ядра	$\Delta m = Zm_p + (A-Z)m_n - m_я$
Енергія зв'язку ядра	$E_{зв} = c^2\Delta m$
Енергія ядерної реакції	$Q = c^2\left(\Sigma M_1 - \Sigma M_2\right)$

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Камертон коливається з частотою $\nu_0 = 800$ Гц і амплітудою $A = 4$ мм. Знайти максимальне прискорення його гілки, що коливається.

Дано: $\nu_0 = 800$ Гц, $A = 4$ мм.

Знайти: $a_{max} - ?$

Рівняння руху гілки камертона має вигляд (у системі СІ):

$$x = Asin\left(2\pi\nu_0 t + \varphi\right) = 0{,}004\,sin\left(2\pi 800t + \varphi\right). \qquad (1)$$

Задача 1. Електрон в атомі водню перейшов з четвертого енергетичного рівня на другий. Визначити енергію випущеного при цьому фотона.

Дано: $n_1 = 2$, $n_2 = 4$

Знайти: $\varepsilon - ?$

Для визначення енергії фотона скористаємося серіальною формулою для водневоподібних систем:

$$\frac{1}{\lambda} = RZ^2\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right), \tag{1}$$

де λ - довжина хвилі фотона; R - постійна Рідберга; Z = 1 - заряд ядра; $n_1 = 2$ - номер орбіти, на яку перейшов електрон; $n_2 = 4$ - номер орбіти, з якої перейшов електрон.

Енергія фотона визначається формулою:

$$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda} = R' Z^2 hc\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right). \tag{2}$$

Так як величина $\varepsilon_i = R' hc = 13{,}6$ еВ є енергія іонізації атома водню, то:

$$\varepsilon = \varepsilon_i Z^2\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right). \tag{3}$$

Здійснивши розрахунки за формулою (3), отримаємо:

$$\varepsilon = 13{,}6 \cdot 1^2\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2}\right) = 2{,}55 \text{ еВ.}$$

Задача 2. Знайти кутову швидкість ω і період обертання T електрона на першій борівській орбіті в атомі водню.

Дано: $m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг, $n = 1$

Знайти: $\omega, T - ?$

За першим постулатом Бора:

$$m\upsilon \cdot r = n\frac{h}{2\pi}, \tag{1}$$

де $m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг - маса електрона, r - радіус орбіти, υ - лінійна швидкість електрона на цій орбіті, h - постійна Планка, $n = 1$ - квантове число, яке відповідає першій орбіті.

Враховуючи, що $\upsilon = \omega \cdot r$, можемо записати:

$$m\omega \cdot r^2 = n\frac{h}{2\pi}. \tag{2}$$

Радіус орбіти визначається за формулою:

$$r_n = n^2 \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m e^2}, \tag{3}$$

де e - заряд електрона, ε_0 електрична стала.

Підставляючи формулу (3) в (2), отримуємо:

$$\omega = \frac{\pi m e^4}{2\varepsilon_0^2 n^3 h^3}. \tag{4}$$

Підставляючи числові значення у формулу (4), отримуємо:

$$\omega = \frac{3{,}14 \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot \left(1{,}6 \cdot 10^{-19}\right)^4}{2 \cdot \left(8{,}85 \cdot 10^{-12}\right)^2 \cdot \left(6{,}62 \cdot 10^{-34}\right)^3} = 4{,}4 \cdot 10^{16} \text{ рад/с.}$$

Період обертання електрона знайдемо за рівнянням:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}. \tag{5}$$

Здійснивши розрахунки за рівнянням (5), знайдемо

$$T = \frac{6{,}28}{4{,}4 \cdot 10^{16}} = 1{,}43 \cdot 10^{-16} \text{ с.}$$

Задача 3. Електрон, початковою швидкістю якого можна знехтувати, пройшов прискорюючи різницю потенціалів *U*. Знайти довжину хвилі де Бройля для двох випадків: 1) $U_1 = 51$ В; 2) $U_2 = 510$ кВ.

Дано: $m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг, $U_1 = 51$ В; $U_2 = 510$ кВ

Знайти: $\lambda_1, \lambda_2 - ?$

Довжина хвилі де Бройля для частинки залежить від її імпульсу p і визначається за формулою:

$$\lambda = \frac{h}{p}, \tag{1}$$

де h - постійна Планка.

Імпульс частинки можна визначити, якщо відома її кінетична енергія E_K. Зв’язок імпульсу з кінетичною енергією неоднаковий для нерелятивістського випадку (коли кінетична енергія частинки набагато менша її енергії спокою) і для релятивістського випадку (коли кінетична енергія сумірна з енергією спокою частинки).

В нерелятивістському випадку:

$$p = \sqrt{2 m_0 E_K}; \tag{2}$$

де $m_0 = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг - маса спокою частинки.

В релятивістському випадку:

$$p = \frac{1}{c}\sqrt{E_K\left(E_K + 2E_0\right)}, \tag{3}$$

де $E_0 = m_0c^2$ - енергія спокою частинки.

Формула (1) із врахуванням співвідношень (2) і (3) в нерелятивістському випадку записується:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0 E_K}}, \qquad (4)$$

в релятивістському випадку:

$$\lambda = \frac{h}{\frac{1}{c}\sqrt{(2E_0 + E_K)E_K}}. \qquad (5)$$

Порівняємо кінетичні енергії електрона, який пройшов різниці потенціалів $U_1 = 51$ В і $U_2 = 510$ кВ, з енергією спокою електрона і в залежності від цього вияснимо, яку із формул (4) і (5) слід застосувати для обрахунку довжини хвилі де Бройля.

Як відомо, кінетична енергія електрона, який пройшов прискорюючу різницю потенціалів *U*:

$$E_K = eU.$$

В першому випадку $E_{K1} = eU_1 = 51\,\text{еВ} = 0{,}51 \cdot 10^{-4}\,\text{МеВ}$, що набагато менше від енергії спокою електрона $E_0 = m_0c^2 = 0{,}51\,\text{МеВ}$. Тому в цьому випадку слід застосувати формулу (4). Для спрощення обрахунків зауважимо, що $E_{K1} = 10^{-4} m_0c^2$. Підставивши цей вираз у формулу (4), перепишемо її у вигляді:

$$\lambda_1 = \frac{h}{\sqrt{2m_0 \cdot 10^{-4} m_0c^2}} = \frac{h}{\sqrt{2m_0^2c^2 \cdot 10^{-4}}}. \qquad (6)$$

Виконаємо обчислення за формулою (6):

$$\lambda_1 = \frac{6{,}62 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \cdot (9{,}1 \cdot 10^{-31})^2 \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \cdot 10^{-4}}} = 171\,\text{пм}.$$

У другому випадку кінетична енергія:

$$E_{K2} = eU_2 = 510\,\text{кеВ} = 0{,}51\,\text{Мев},$$

тобто рівна енергії спокою електрона. В цьому випадку необхідно застосувати релятивістську формулу (5).

Врахувавши, що $E_{K2} = 0{,}51\,\text{МеВ} = m_0c^2$, за формулою (5) знайдемо:

$$\lambda_2 = \frac{h}{\frac{1}{c}\sqrt{(2m_0c^2 + m_0c^2)m_0c^2}} = \frac{h}{\sqrt{3}m_0c^2}. \qquad (7)$$

Виконаємо обчислення за формулою (7):

$$\lambda_2 = \frac{6{,}62\cdot 10^{-34}}{\sqrt{3}\cdot 9{,}1\cdot 10^{-31}\cdot (3\cdot 10^8)^2} = 1{,}4 \text{ пм.}$$

Задача 4. Кінетична енергія E_K електрона в атомі водню складає величину 10 еВ. Використовуючи співвідношення невизначеностей, оцінити мінімальні лінійні розміри атома.

Дано: E_K=10 еВ, $m_0 = 9{,}1\cdot 10^{-31}$ кг

Знайти: $l_{min} - ?$

Співвідношення невизначеностей для координати і імпульсу має вигляд:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar = \frac{h}{2\pi}, \tag{1}$$

де Δx - невизначеність координати частинки (в даному випадку електрона); Δp - невизначеність імпульсу частинки (електрона); h - постійна Планка.

Зі співвідношення невизначеностей випливає, що чим точніше визначається положення частинки в просторі, тим більш невизначеним стає імпульс, а відповідно, і енергія частинки. Нехай атом має лінійні розміри l, тоді електрон атома буде знаходитися в межах області з невизначеністю:

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

Співвідношення невизначеностей (2) можна записати в цьому випадку у вигляді

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

Звідки:

$$l \geq \frac{2\hbar}{\Delta p}. \tag{3}$$

Невизначеність імпульсу Δp, в будь-якому випадку, не повинна перевищувати значення самого імпульсу p, тобто:

$$\Delta p \leq p .$$

Імпульс p пов'язаний з кінетичною енергією E_K співвідношенням:

$$p = \sqrt{2m_0 E_K}.$$

Замінимо Δp значенням $\sqrt{2m_0 E_K}$. Перейшовши від нерівності до рівності, отримаємо:

$$l_{min} = \frac{2\hbar}{\sqrt{2m_0 E_K}}. \tag{4}$$

Підставимо числові значення у рівняння (4) і виконаємо обчислення:

$$l_{min} = \frac{2 \cdot 1{,}05 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 10}} = 1{,}24 \cdot 10^{-10}\ \text{м}=124\ \text{пм}.$$

Завдання 5. Визначити можливі значення орбітального моменту імпульсу L_l електрона в збудженому атомі водню, якщо енергія збудження ε =12,09 еВ.

Дано: ε =12,09 еВ

Знайти: $L_l - ?$

Орбітальний момент імпульсу L_l електрона визначається квантовим числом *l* за формулою:

$$L_l = \hbar\sqrt{l(l+1)}\,, \tag{1}$$

де *l* - орбітальне квантове число (*l*=0,1,2,…, *n*-1); $\hbar = h/2\pi = 1{,}06 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Так як ряд можливих значень *l* обмежений величиною *n*-1, знайдемо головне квантове число *n* за формулою:

$$E_n = -me^4 / 32\pi^2\varepsilon_0^2\hbar^2 n^2\,. \tag{2}$$

Формулу (2) перепишемо, враховуючи, що при *n* =1 E_1 = -13,6 еВ:

$$E_n = -\frac{13{,}6}{n^2}\ \text{еВ}. \tag{3}$$

Енергія збудження ε є квант енергії, поглинутий атомом при переході з основного стану (*n* = 1) в збуджений. Тому,:

$$E_n - E_1 = \varepsilon\,. \tag{4}$$

Підставивши числові значення величин, виражені в електрон-вольтах, отримаємо

$$-\frac{13{,}6}{n^2} + 13{,}6 = 12{,}09\,,$$

Звідки *n* = 3. Відповідно *l* = 0, 1, 2.

За формулою (1) знайдемо можливі значення L_l:

при $l = 0$ $L_l = 0$;

при $l = 1$ $L_l = \hbar\sqrt{2} = 1{,}49 \cdot 10^{-34}$ Дж·с;

при $l = 2$ $L_l = \hbar\sqrt{6} = 2{,}6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Задача 6. Обчислити дефект маси і енергію зв’язку ядра ${}^{7}_{3}Li$.

Дано: ${}^{7}_{3}Li$

Знайти: $\Delta m, E_{зв} - ?$

Маса ядра завжди менша від суми мас вільних протонів і нейтронів (знаходяться поза ядром), з яких ядро утворилось.

Дефект маси ядра (Δm) і є різницею між сумою мас вільних нуклонів (протонів і нейтронів) і масою ядра, тобто:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_я, \tag{1}$$

де Z - атомний номер (число протоні у ядрі); A - масове число (число нуклонів у ядрі); $m_p, m_n, m_я$ - відповідно маси протона, нейтрона і ядра.

В довідкових таблицях завжди даються маси нейтральних атомів, але не ядер. Тому формулу (1) доцільно змінити так, щоб в неї входила маса M нейтрального атома.

Можна рахувати, що маса нейтрального атома рівна сумі мас ядра і електрона, які складають електронну оболонку атома:

$$M = m_я + Zm_e,$$

звідки:

$$m_я = M - Zm_e. \tag{2}$$

Підставивши формулу (2) в (1), отримаємо:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M + Zm_e,$$

або:

$$\Delta m = Z(m_p + m_e) + (A - Z)m_n - M.$$

Помітивши, що $m_p + m_e = M_H$, де M_H - маса атома водню, на кінець знайдемо:

$$\Delta m = ZM_H + (A - Z)m_n - M. \tag{3}$$

Підставивши у вираз (3) числові значення мас (згідно довідкових даних), отримаємо:

$$\Delta m = \left[3 \cdot 1{,}00783 + (7 - 3) \cdot 1{,}00867 - 7{,}01601\right] = 0{,}04216 \text{ а.о.м.}$$

Енергією зв'язку $E_{зв}$ ядра називається енергія, яка в тій чи іншій формі виділяється при утворенні ядра із вільних нуклонів.

Відповідно до закону пропорційності маси і енергії:

$$E_{зв} = c^2 \Delta m, \tag{4}$$

де c - швидкість світла у вакуумі.

Коефіцієнт пропорційності c^2 може бути виражений двояко:

$$c^2 = 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2,$$

або:

$$c^2 = \frac{\Delta E_{зв}}{\Delta m} = 9 \cdot 10^{16} \text{ Дж/кг.}$$

Якщо обчислити енергію зв'язку, користуючись позасистемними одиницями, то $c^2 = 931$ МеВ/а.о.м.

З врахуванням цього формула (4) набуде вигляду:

$$E_{зв} = 931 \Delta m \text{ МеВ.} \tag{5}$$

Підставивши раніше знайдене значення дефекта маси ядра у формулу (5), отримаємо:

$$E_{зв} = 931 \cdot 0,4216 = 39,2 \text{ МеВ}.$$

Задачі для самостійного розв'язування

8.1. Визначити період піврозпаду радіоактивного ізотопу, якщо 5/8 початкової кількості ядер цього ізотопу розпалось за час 849 с.

8.2. Постійна радіоактивного розпаду ізотопу ${}^{210}_{82}Pb$ рівна 10^{-9} $с^{-1}$. Визначити час, протягом якого розпадеться 2/5 початкової кількості ядер цього радіоактивного ізотопу.

8.3. Початкова маса радіоактивного ізотопу йоду ${}^{131}_{53}I$ (період піврозпаду $T_{1/2}$=8 діб) дорівнює 1 г. Визначити: початкову активність ізотопу; активність ізотопу через 3 доби.

8.4. Знайти постійну розпаду λ та середній час життя τ радіоактивного ${}^{55}Co$, якщо його активність зменшується на 4 % за час 1 год.

8.5. Інтенсивність вузького пучка γ-випромінювання після проходження через шар свинцю товщиною 4 см зменшилася у 8 разів. Визначити енергію γ-фотонів і товщину $x_{1/2}$ шару половинного поглинання.

8.6. Вузький пучок γ-випромінювання (енергія γ -фотонів дорівнює 2,4 МеВ) проходить через бетонну плиту товщиною 1 м. Якої товщини плита із чавуну дає таке ж послаблення даного пучка γ-випромінювання?

8.7. Чавунна плита зменшує інтенсивність вузького пучка γ-випромінювання (енергія γ -фотонів дорівнює 2,8 МеВ) в 10 разів. У скільки разів зменшує інтенсивність цього пучка свинцева плита такої ж товщини?

8.8. Знайти електричну потужність атомної електростанції, на якій витрачається 0,1 кг урану-235 за добу, якщо к.к.д. станції дорівнює 16 %.

8.9. При поділі одного ядра урану-235 виділяється енергія 200 МеВ. Яку частину енергії спокою ядра уруну-235 становить звільнена енергія?

8.10. Яку енергію (в кіловат-годинах) можна отримати від поділу маси 1 г урану ${}^{235}_{92}U$, якщо при кожному акті розпаду виділяється енергія 200 МеВ?

8.11. При збільшенні енергії електрона на 200 еВ його дебройлівська довжина хвилі змінилася в два рази. Знайти початкову довжину хвилі електрона.

8.12. Знайти довжину хвилі де Бройля для атома водню, що рухається зі швидкістю, яка дорівнює середній квадратичній швидкості, при температурі 300 К.

8.13. Електрон, початковою швидкістю якого можна знехтувати, пройшов прискорювальну різницю потенціалів 51 В. Знайти довжину хвилі де Бройля.

8.14. Електрон, початковою швидкістю якого можна знехтувати, пройшов прискорювальну різницю потенціалів 510 кВ. Знайти довжину хвилі де Бройля.

8.15. Яку прискорювальну різницю потенціалів повинен пройти електрон, щоб довжину хвилі де Бройля була рівною 0,1 нм?

8.16. Визначити довжину хвилі де Бройля для вільного електрона, що рухається зі швидкістю 10^6 м/с.

8.17. Яку прискорювальну різницю потенціалів повинен пройти протон, щоб довжину хвилі де Бройля була рівною 1 нм?

8.18. Кінетична енергія електрона рівна 0,6 МеВ. Визначити довжину хвилі де Бройля .

8.19. Визначити в скільки разів початкова кількість ядер радіоактивного ізотопу зменшується за три роки, якщо за один рік вона зменшується у 4 рази.

8.20. Визначити, яка частина (у %) від початкової кількості ядер радіоактивного ізотопу не розпадеться протягом часу *t*, що вдвічі більший за середній час життя τ радіоактивного ядра.

8.21. Визначити період піврозпаду радіоактивного ізотопу, якщо 5/8 початкової кількості ядер цього ізотопу розпалось за час 849 с.

8.22. Постійна радіоактивного розпаду ізотопу ${}^{210}_{82}Pb$ рівна 10^{-9} $с^{-1}$. Визначити час, протягом якого розпадеться 2/5 початкової кількості ядер цього радіоактивного ізотопу.

8.23. Початкова маса радіоактивного ізотопу йоду ${}^{131}_{53}I$ (період піврозпаду $T_{1/2}$=8 діб) дорівнює 1 г. Визначити: початкову активність ізотопу; активність ізотопу через 3 доби.

8.24. Знайти постійну розпаду λ та середній час життя τ радіоактивного ${}^{55}Co$, якщо його активність зменшується на 4 % за час 1 год.

8.25. Інтенсивність вузького пучка γ-випромінювання після проходження через шар свинцю товщиною 4 см зменшилася у 8 разів. Визначити енергію γ-фотонів і товщину $x_{1/2}$ шару половинного поглинання.

8.26. Вузький пучок γ-випромінювання (енергія γ -фотонів дорівнює 2,4 МеВ) проходить через бетонну плиту товщиною 1 м. Якої товщини плита із чавуну дає таке ж послаблення даного пучка γ-випромінювання?

8.27. Чавунна плита зменшує інтенсивність вузького пучка γ-випромінювання (енергія γ -фотонів дорівнює 2,8 МеВ) в 10 разів. У скільки разів зменшує інтенсивність цього пучка свинцева плита такої ж товщини?

8.28. Знайти електричну потужність атомної електростанції, на якій витрачається 0,1 кг урану-235 за добу, якщо к.к.д. станції дорівнює 16 %.

8.29. При поділі одного ядра урану-235 виділяється енергія 200 МеВ. Яку частину енергії спокою ядра уруну-235 становить звільнена енергія?

8.30. Яку енергію (в кіловат-годинах) можна отримати від поділу маси 1 г урану ${}^{235}_{92}U$, якщо при кожному акті розпаду виділяється енергія 200 МеВ?

ДОВІДКОВІ ТАБЛИЦІ

Таблиця 1. Основні фізичні константи

Швидкість світла у вакуумі	$c = 299792458\ м/с$
Стала всесвітнього тяжіння	$G = 6,67 \cdot 10^{-11}\ м^3\ /\left(кг \cdot с\right)$
Магнітна стала	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ Гн/м$
Електрична стала	$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}\ Ф/м$
Стала Планка	$h = 6.63 \cdot 10^{-34}\ Дж \cdot с$
Маса електрона	$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}\ кг$
Маса протона	$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}\ кг$
Маса нейтрона	$m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}\ кг$
Елементарний заряд	$e = 1,6 \cdot 10^{-19}\ Кл$
Питомий заряд електрона	$-e/m = -1,75881962 \cdot 10^{11}\ Кл/кг$
Маса α -частинки	$m_\alpha = 6,64 \cdot 10^{-27}\ кг$
Заряд α -частинки	$+q = +2e = +3,2 \cdot 10^{-19}\ Кл$
Універсальна газова стала	$R = 8,314510\ \ Дж/(моль \cdot К)$
Стала Авогадро	$N_A = 6,0221367 \cdot 10^{23}\ моль^{-1}$
Стала Больцмана	$k = 1,380658 \cdot 10^{-23}\ Дж/К$
Число Лошмідта	$N_Л$=2.7 $\cdot\ 10^{25}\ м^{-3}$
Стала Стефана - Больцмана	$\sigma = 5,67051 \cdot 10^{-8}\ Вт/(м^2 \cdot К^4)$
Магнетон Бора для електрона	$\mu_Б = 9,273096 \cdot 10^{-24}\ Дж/Тл$
Ядерний магнетон	$\mu_N = 5,050951 \cdot 10^{-27}\ Дж/Тл$
Атомна одиниця маси	1 а.о.м.$=1.66 \cdot 10^{-27}\ кг$

Таблиця 2. Астрономічні величини

Середня густина Землі	$5500\ кг/м^3$
Середній радіус Землі	$6.37 \cdot 10^6\ м$
Маса Землі	$5.96 \cdot 10^{24}\ кг$
Середня густина Сонця	$1400\ кг/м^3$
Радіус Сонця	$6.95 \cdot 10^8\ м$
Маса Сонця	$1.97 \cdot 10^{30}\ кг$
Радіус Місяця	$1.74 \cdot 10^6\ м$

Маса Місяця	$7.3 \cdot 10^{22}$ *кг*
Середня відстань між центрами Місяця і Землі	$3.84 \cdot 10^{8}$ *м*
Середня відстань між центрами Землі і Сонця	$1.5 \cdot 10^{11}$ *м*
Період обертання Місяця навколо Землі	*27.3 доби* = $2.36 \cdot 10^{6}$ *с*

Таблиця 3. Густина речовини ρ **,** $кг/м^3$

Гази за нормальних умов ($T_0 = 273{,}15\,K$, $p_0 = 1{,}01 \cdot 10^5\,Па$)			
Водень	0,089	Неон	0,900
Гелій	0,178	Вуглекислий газ	1,977
Азот	1,250	Метан	0,717
Кисень	1,429	Повітря	1,293
Рідини			
Бензол ($t = 20^0\,C$)	879	Скипидар ($t = 16^0\,C$)	858
Вода ($t = 4^0\,C$)	1000	Спирт етиловий ($t = 0^0\,C$)	789
Гас ($t = 0^0\,C$)	800	Спирт метиловий ($t = 0^0\,C$)	792
Гліцерин ($t = 0^0\,C$)	1260	Толуол ($t = 18^0\,C$)	870
Олія рицинова ($t = 20^0\,C$)	950	Ртуть ($t = 0^0\,C$)	13596

Таблиця 4. Коефіцієнт внутрішнього тертя деяких газів при $t = 0^0\,C$

Газ	$\eta \cdot 10^6$, $Па \cdot с$
Азот	16,7
Водень	8,4
Вуглекислий газ	14,0
Гелій	18,9
Кисень	19,2
Аргон	22,9
Повітря сухе*	17,5

Таблиця 5. Коефіцієнт динамічної в’язкості деяких рідин при $t = 20^0\ C$

Рідина	$\eta \cdot 10^3$, $Па \cdot с$
Ацетон	0,31
Етиленгліколь	16,1
Метиловий спирт	0,544
Бензол	0,673
Вода	1,005
Гліцерин	1480
Олія рицинова	970
Ртуть	1,590
Спирт етиловий	1,2

Таблиця 6. Коефіцієнт поверхневого натягу деяких рідин на межі «рідина - повітря» при $t = 20^0\ C$

Рідина	$\alpha \cdot 10^3$, $Н/м$
Анілін	42,9
Ацетон	23,7
Вода	72,6
Азотна кислота (70%)	59,4
Сірчана кислота (85%)	57,4
Оцтова кислота	27,8
Бензол	30
Гліцерин	66
Олія рицинова	36,4
Гас	24
Бензин	21
Мильний розчин	40
Молоко	46
Нафта	30
Ртуть	510
Спирт етиловий	22
Етиловий ефір	16,9

*Склад повітря по об’єму: 78,03% N_2, 20,99% O_2, 0,933% Ar, 0,03% CO_2, 0,01 H_2, 0,0018 Ne і ін.

Таблиця 7. Тиск та густина насиченої водяної пари при різних температурах

$t,^{\circ}C$	$p_н$, *ГПа*	$\rho_н$, *г/м*^{3}	$t,^{\circ}C$	$p_н$, *ГПа*	$\rho_н$, *г/м*^{3}	$t,^{\circ}C$	$p_н$, *ГПа*	$\rho_н$, *г/м*^{3}
0	6,11	4,84	11	13,12	10,0	22	26,44	19,4
1	6,57	5,22	12	14,03	10,7	23	28,93	20,6
2	7,05	5,60	13	14,97	11,4	24	29,84	21,8
3	7,59	5,98	14	15,99	12,1	25	31,68	23,0
4	8,13	6,40	15	17,05	12,8	26	33,61	24,4
5	8,72	6,48	16	18,17	13,6	27	35,65	25,8
6	9,35	7,30	17	19,37	14,5	28	37,80	27,2
7	10,01	7,80	18	20,64	15,4	29	40,05	28,7
8	10,73	8,30	19	21,97	16,3	30	42,42	30,8
9	11,48	8,80	20	23,65	17,3	31	44,93	32,1
10	12,28	9,40	21	24,87	18,3	32	47,54	33,9

Таблиця 8. Ефективні діаметри молекул та атомів *d, м*

Азот (N_2)	$3.1 \cdot 10^{-10}$	Водяна пара (H_2O)	$2.9 \cdot 10^{-10}$
Аргон (Ar)	$2.9 \cdot 10^{-10}$	Гелій (He)	$1.9 \cdot 10^{-10}$
Водень (H_2)	$2.7 \cdot 10^{-10}$	Кисень (O_2)	$2.9 \cdot 10^{-10}$
Вуглекислий газ (CO_2)	$3.3 \cdot 10^{-10}$	Оксид вуглецю (CO)	$3.2 \cdot 10^{-10}$
		Хлор (Cl_2)	$3.6 \cdot 10^{-10}$

Таблиця 9. Пружні властивості твердих тіл: модуль Юнга E, $Па$; модуль зсуву β, $Па$; коефіцієнт Пуассона ν; границя міцності $\sigma_з$, $Па$

Матеріал	$E \cdot 10^{-10}$	$\beta \cdot 10^{-10}$	ν	$\sigma_з \cdot 10^{-8}$
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
Сталь	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	10 – 13	3,8 – 4,7	0,31 – 0,40	1,56 – 4,41
Свинець	1,5 – 1,7	0,54	0,44	0,0196

Таблиця 10. Питомі теплоємності газів та показник адіабати

Речовина	c_p, Дж/кг · К	c_V, Дж/кг · К	γ
Азот	1051	745	1.41
Аміак	2244	1675	1.34
Водень	14269	10132	1.41

Таблиця 11. Діелектричні проникності деяких речовин при $t = 20^0\ C$

Речовина	ε	Речовина	ε	Речовина	ε
Азот	1,00060	Вода	81	Парафін	2
Водень	1,00027	Гас	2,1	Плексиглас	3,3
Повітря	1,00058	Гліцерин	39,1	Скло	7
Кисень	1,00055	Масло	2,5	Слюда	6
Вуглекислий газ	1,00096	Спирт етиловий	25	Полівінілхлорвініл	4
		Скипидар	2,2	Текстоліт	7
				Поліетилен	2,3
				Капрон	4,2

Таблиця 12. Питомий опір деяких речовин при $t = 20^0\ C$

Речовина	$\rho\cdot 10^8$, *Ом·м*	Речовина	$\rho\cdot 10^8$, *Ом·м*
Алюміній	2,8	Нікелін	42
Вольфрам	5,5	Ніхром	110
Графіт	1300	Платина	10
Ебоніт	10^{18}	Ртуть	95,8
Залізо	10	Свинець	21
Золото	2,4	Срібло	1,6
Константан	50	Сталь	12
Латунь	7,1	Фарфор	10^{21}
Манганін	45	Фехраль	120
Мідь	1,7	Хромель	140

Таблиця 13. Температурний коефіцієнт опору деяких речовин

Речовина	*α, 1/К*	Речовина	*α, 1/К*
Алюміній	0,0042	Нікель	0,0001
Вольфрам	0,0046	Ніхром	0,0001
Вугілля	0,0008	Олово	0,0042
Залізо	0,0060	Платина	0,0038
Іридій	0,0039	Радій	0,0044
Константан	0,000003	Ртуть	0,0009
Латунь	0,0010	Свинець	0,0042
Манганіт	0,000030	Срібло	0,0040
Мідь	0,0043	Сталь	0,0050
Натрій	0,0044	Цинк	0,0037
Нейзильбер	0,0003	Чавун	0,0010

Таблиця 14. Магнітна сприйнятливість та проникність для деяких матеріалів

Середовище	Сприйнятливість χ	Проникність μ
Пермалой	8000	7960
Електрична сталь	4000	3980
Ферит (нікельо-цинковий)	–	16-640
Ферит (манганезо-цинковий)	–	640
Сталь	700	696
Нікель	100	99,5
Платина	$2{,}65\cdot 10^{-4}$	1,0003
Алюміній	$2{,}22\cdot 10^{-5}$	1,00002

Таблиця 15. Точка Кюрі деяких речовин

Речовина	Точка Кюрі, *K*	
	Верхня	Нижня
Сегнетоелектрики		258,0
Метатитанат барію	373	
Сегнетова сіль	295,5	
Феромагнетики		
Залізо	1043	
Залізо кременисте (4,3% Si)	963	
Кобальт	1403	
Нікель	631	
Пермалой	823	
Магнетит	845	
Сплав Гейслера	603	

Таблиця 16. Абсолютні показники заломлення деяких середовищ

Речовина	n	Речовина	n
Алмаз	2,42	Цукор	1,56
Анілін	1,59	Сірковуглець	1,63
Ацетон	1,36	Сильвін	1,49
Бензол	1,50	Скипидар	1,51
Вода	1,33	Спирт метиловий	1,33
Повітря	1,0003	Спирт етиловий	1,36
Гліцерин	1,47	Скло (легкий крон)	1,5
Кам’яна сіль	1,54	Скло (флінт)	1,6-1,8
Кварц	1,54	Чотирьох хлористий вуглець	1,46
Лід	1,31		

Таблиця 17. Робота виходу електронів із деяких металів

Метал	A, *еВ*	A, *Дж*
Калій	2,2	$3{,}5\cdot10^{-19}$
Літій	2,3	$3{,}7\cdot10^{-19}$
Натрій	2,5	$4\cdot10^{-19}$
Платина	6,3	$1{,}01\cdot10^{-18}$
Срібло	4,7	$7{,}5\cdot10^{-19}$
Цинк	4,0	$6{,}4\cdot10^{-19}$
Вольфрам	4,53	$7{,}25\cdot10^{-19}$

Таблиця 18. «Червона межа» фотоефекту для деяких речовин

Речовина	λ_{max}, *нм*	Речовина	λ_{max}, *нм*
Барій	484	Платина	190
Барій на вольфрамі	1130	Рубідій	573
Вольфрам	272	Срібло	261
Германій	272	Торій на вольфрамі	473
Закис міді	239	Цезій	662
Нікель	249	Цезій на вольфрамі	909
Оксид барію	1235	Цезій на платині	895

Таблиця 19. Маса і енергія спокою деяких частинок

Частинки	m_0		E_0	
	а .о. м.	10^{-27}, кг	МэВ	10^{-10},Дж
Електрон	0,0005486	0,000911	0,511	0,00082
Протон	1,007277	1,67251	938,27	1,503
Нейтрон	1,008665	1,67482	939,56	1,505
α -частинка	4,001507	6,64422	3727,3	5,972
Нейтральний π-мезон	0,14526	0,241	135	-
Дейтрон	2,01355	3,35	1876	3,00

Таблиця 20. Маса деяких нейтральних атомів (а. о. м.)

Елемент	Порядковий номер	Ізотоп	Маса
(Нейтрон)	0	n	1,00867
Водень	1	^1H ^2H ^3H	1,007825 2,014102 3,016049
Гелій	2	^3He ^4He	3,01603 4,002604
Літій	3	^6Li ^7Li	6,01513 7,016005

Берилій	4	^{7}Be ^{9}Be ^{10}Be	7,01693 9,01219 10,01354
Бор	5	^{9}B ^{10}B ^{11}B	9,01333 10,012935 11,009305
Вуглець	6	^{10}C ^{12}C ^{13}C ^{14}C	10,00168 12,00000 13,00335 14,00324
Азот	7	^{13}N ^{14}N ^{15}N	13,00574 14,00307 15,00011
Кисень	8	^{16}O ^{17}O ^{18}O	15,99491 16,99913 17,99916
Елемент	Порядковий номер	Ізотоп	Маса
Алюміній	13	^{27}Al	29,98146
Свинець	82	^{226}Pb	205,97446
Радій	88	^{226}Ra	226,02536
Радон	86	^{226}Rn	222,01753

Таблиця 21. Періоди піврозпаду деяких нуклідів

Нуклід	Період піврозпаду, T	Нуклід	Період піврозпаду, T
$^{192}_{77}Ir$	74,4 доби	$^{45}_{20}Ca$	153 дні
$^{14}_{6}C$	5730 років	$^{210}_{82}Pb$	22,3 років
$^{137}_{55}Cs$	26,6 року	$^{226}_{88}Ra$	1600 років
$^{60}_{27}Co$	5,2 року	$^{204}_{81}Te$	3,56 року
$^{90}_{38}Sr$	28,1 року	$^{239}_{94}Pu$	$24{,}39\cdot10^{3}$ років
$^{235}_{92}U$	$7\cdot10^{6}$ років	$^{210}_{84}Po$	138,4 доби
$^{238}_{92}U$	$4{,}51\cdot10^{9}$ років	$^{212}_{84}Po$	$3\cdot10^{-7}$ секунд

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Курс фізики / І. Р. Зачек, І. М. Кравчук, Б. М. Романишин та ін. - Л.: Бескид Біт, 2002. - 375 с.
2. Вайданич В.І., Пенцак Г.М. Фізика. Навчальний посібник. - Львів: Національний лісотехнічний університет України, 2005.- 664 с.
3. Кучерук І. М. Загальний курс фізики: Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка/ Кучерук І. М. - К.: Техніка, 2006. – 532 с.
4. І.Є. Лопатинський, І.Р. Зачек, Г.А. Ільчук, Б.М. Романишин. Фізика. Підручник. - Львів: «Афіша», 2005. – 394 с.
5. Бушок Г.Ф., Венгер Є.Ф. Курс фізики: Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Вища школа, 2002. - 375 с.
6. Кучерук І.М. та ін. Загальний курс фізики / За ред. І.М. Кучерука. - 2-ге вид., випр. - К.: Техніка, 2006. - 432 с.
7. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики: У 3-х т.: Навч. посібник для студ. вищих техн. і пед. закладів освіти; За ред. І.М.Кучерука.- К.: Техніка, 2001.-Т. 2: Електрика і магнетизм. – 452 с.
8. Бушок Г.Ф., Венгер Є.Ф. Курс фізики: Навч. посібник: У 2 кн. Кн.2.Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. - К.: Либідь, 2001. - 424с.
9. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф. Курс фізики: Навч. посібник: У 2 кн. Кн.1.Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. - 2-ге вид. - К.: Либідь, 2001. - 448с.
10. Волков О.Ф., Лумпієва Т.П. Курс фізики: У 2-х т. Т.1: Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка. Електростатика. Постійний струм. Електромагнетизм: Навчальний посібник для студентів технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. - Донецьк: ДонНТУ, 2009. - 224 с.
11. Волков О.Ф., Лумпієва Т.П. Курс фізики: У 2-х т. Т.2: Коливання і хвилі. Хвильова і квантова оптика. Елементи квантової механіки. Основи фізики твердого тіла. Елементи фізики атомного ядра: Навчальний посібник для студентів технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. - Донецьк: ДонНТУ, 2009. - 208 с.
12. Загальні основи фізики: У двох книгах. Кн.1. Механіка. Термодинаміка та молекулярна фізика: Навч. посібник / І.Г. Богацька, Д.Б. Головко, А.А. Маляренко, Ю.Л. Ментковський; За ред. Д.Б. Головка, Ю.Л. Ментковського. - К.: Либідь, 1998. - 192с.
13. Фізика для інженерних спеціальностей. Кредитно-модульна система: Навч. посібник. - У 2 ч. / В.В. Куліш, А.М. Соловйов, О.Я. Кузнєцова, В.М. Кулішенко. - К.: Книжкове вид-во НАУ, 2005.
14. Азнаурян І.О. Фізика та фізичні методи дослідження: Навчальний посібник. - К.: КНУБА, 2008. - 250 с.

Ф 50

Фізика [Текст]: методичні вказівки до виконання КПІЗ для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання / уклад. Ю.В. Коваль, Д.А. Захарчук. – Луцьк: ЛНТУ, 2025. – 88 с.

Комп'ютерний набір та верстка: Д.А. Захарчук, Ю.В. Коваль

Редактори: Ю.В. Коваль, Д.А. Захарчук

Підп. до друку «__»________2025 р. Формат 60х84/16. Папір офс.
Гарн. Таймс. Ум. друк. арк. 3,5. Обл.-вид. арк. 2,3
Тираж 50 прим.

Інформаційно-видавничий відділ
Луцького національного технічного університету
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75
Друк – ІВВ ЛНТУ