

**УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

А.В.Попов, Р.В.Вовк, Н.В.Глейзер,
В.Ю.Гресь, М.Г.Ревякіна

ЗАДАЧІ З ФІЗИКИ

Харків 2009

Задачі розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри “Фізика” 11 листопада 2008 р., протокол № 4.

Дана робота містить понад 400 задач з курсу загальної фізики. Вона складена у відповідності до навчальної програми для технічних ВНЗ. Тематика задач охоплює усі розділи курсу – від механіки до ядерної фізики. Приділяється увага використанню основних фізичних закономірностей у техніці. На початку кожного розділу наводяться основні формули, які в ньому використовуються. До всіх задач дано відповіді.

Задачі призначені для студентів академії залізничного транспорту, а також вони можуть бути корисними для студентів інших технічних ВНЗ.

Укладачі:

доценти А.В.Попов, Н.В.Глейзер, В.Ю.Гресь, М.Г.Ревякіна,
проф. Р.В.Вовк

Рецензенти:

проф. Ю.Е.Крот (ХДТУБА),
проф. М.О.Оболенський (ХНУ ім. В.Н.Каразіна)

ЗМІСТ

1	Механіка	5
1.1	Кінематика	5
1.2	Динаміка матеріальної точки	11
1.3	Обертальний рух твердого тіла	17
1.4	Релятивістська механіка (спеціальна теорія відносності)	21
2	Коливання та хвилі	24
2.1	Механічні коливання	24
2.2	Хвилі в пружному середовищі	29
3	Молекулярна фізика і термодинаміка	31
3.1	Основи молекулярно-кінетичної теорії	31
3.2	Перший початок термодинаміки	35
3.3	Другий початок термодинаміки	39
4	Електростатика	42
4.1	Закон Кулона. Напруженість і потенціал електричного поля.....	42
4.2	Електроємність. Енергія електричного поля	47
4.3	Електричне поле в діелектриках	50
5	Постійний електричний струм	52
6	Електромагнетизм	58
6.1	Магнітне поле струмів.....	58
6.2	Рух заряджених частинок у магнітному полі.....	63
6.3	Явище електромагнітної індукції. Енергія магнітного поля	63
6.4	Електромагнітне поле. Рівняння Максвелла	68
7	Хвильова оптика	70
7.1	Інтерференція світла	70
7.2	Дифракція світла	73
7.3	Поляризація світла	75
8	Теплове випромінювання. Квантова природа світла	77
8.1	Закони теплового випромінювання	77

8.2	Фотоелектричний ефект. Фотони	78
8.3	Гальмівне рентгенівське випромінювання. Ефект Комптона. Тиск світла	80
9	Атомна і ядерна фізика.....	83
9.1	Атом Бора. Хвильові властивості частинок	83
9.2	Закон радіоактивного розпаду. Енергія зв'язку ядер ..	86
	Вказівки й відповіді	90
	Список літератури	104

1 Механіка

1.1 Кінематика

- Середні значення швидкості й прискорення точки:

$$v_{\text{сеп}} = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad a_{\text{сеп}} = \frac{\Delta v}{\Delta t}, \quad (1.1)$$

де Δx – переміщення точки (збільшення координати), Δt – проміжок часу, за який відбувається це переміщення.

- Швидкість і прискорення точки:

$$v = \frac{dx}{dt}, \quad a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}. \quad (1.2)$$

- Проекції прискорення точки на дотичну й нормаль до траєкторії (відповідно *тангенціальне* й *нормальне* прискорення):

$$a_{\tau} = \frac{dv}{dt}, \quad a_n = \frac{v^2}{R}, \quad (1.3)$$

де v – модуль швидкості, R – радіус кривизни траєкторії в даній точці.

- Повне прискорення:

$$a = \sqrt{a_{\tau}^2 + a_n^2}. \quad (1.4)$$

- Кутова швидкість і кутове прискорення твердого тіла:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}, \quad \varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}, \quad (1.5)$$

де φ – кут повороту тіла навколо деякої осі.

- Кутова швидкість при рівномірному обертанні твердого тіла навколо осі:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi n, \quad N = \frac{\varphi}{2\pi}, \quad (1.6)$$

де T – *період* обертання – час, за який відбувається один оберт; n – *частота* обертання – число обертів за одиницю часу; N – повне число обертів.

- Зв'язок лінійних і кутових величин:

$$v = \omega R, \quad a_\tau = \varepsilon R, \quad a_n = \omega^2 R, \quad (1.7)$$

де R – відстань від осі обертання до розглянутої точки тіла.

- У таблиці 1.1 дане зіставлення рівнянь поступального руху з рівняннями обертального руху.

Таблиця 1.1

Поступальний рух	Обертальний рух
Рівномірний	
$s = v t$ $v = const$ $a = 0$	$\varphi = \omega t$ $\omega = const$ $\varepsilon = 0$
Рівнозмінний	
$s = v_0 t + \frac{a t^2}{2}$ $v = v_0 + a t$ $a = const$	$\varphi = \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}$ $\omega = \omega_0 + \varepsilon t$ $\varepsilon = const$

1.1 Літак щодо повітря переміщується зі швидкістю $v_1 = 800$ км/год. Із заходу на схід дує вітер, швидкість якого $v_2 = 15$ м/с. З якою швидкістю v буде рухатися літак відносно Землі й під яким кутом α до меридіана необхідно тримати курс, щоб переміщення літака відбувалося в напрямку північ – південь?

1.2 Човен рухається перпендикулярно до берега зі швидкістю $v = 7,2$ км/год. Течія відносить його на відстань $s = 150$ м вниз по

річці. Знайти: 1) швидкість v_1 течії річки; 2) час t , витрачений на переправу. Ширина річки $d = 0,5$ км.

1.3 Дві автомашини рухаються по двох прямих взаємно перпендикулярних дорогах до перехрестя із сталими швидкостями $v_1 = 80$ км/год й $v_2 = 90$ км/год. Перед початком руху перша машина перебувала на відстані $s_1 = 9$ км від перехрестя, друга – на відстані $s_2 = 8$ км. Через який час t після початку руху відстань s між машинами буде мінімальною?

1.4 Тіло проходить однакові ділянки шляху зі сталими в межах ділянок швидкостями v_1, v_2, \dots, v_n . Визначити середню швидкість тіла $v_{\text{сеп}}$ на всьому шляху.

1.5 Тіло рухається так, що швидкості його протягом кожного з n рівних проміжків часу відповідно дорівнюють v_1, v_2, \dots, v_n . Яка середня швидкість тіла?

1.6 За час τ швидкість тіла змінювалася за законом $v = bt + ct^2$ ($0 \leq t \leq \tau$). Яка його середня швидкість за проміжок часу τ ?

1.7 Тіло починає рухатися зі сталим прискоренням $a = 0,1$ м/с², маючи початкову швидкість $v_0 = 1$ м/с. За який час t воно пройде відстань $s = 20$ м? Чому дорівнює його миттєва швидкість v у момент часу t ?

1.8 Тіло з початковою швидкістю $v_0 = 10$ м/с рухається рівносповільнено та зупиняється, пройшовши шлях $s = 20$ м. Чому дорівнює прискорення тіла a ? Скільки часу t потрібно для повної зупинки тіла? Побудуйте графік залежності $v = v(t)$, а також графік залежності $s = s(t)$.

1.9 Тіло, кинуте вертикально вгору, повернулося на землю через $t = 3$ с. Якою була початкова швидкість v_0 тіла? На яку висоту h піднялось тіло? Опір повітря не враховувати.

1.10 Тіло кинули вертикально вгору з початковою швидкістю $v_0 = 28$ м/с. На яку найбільшу висоту H воно підніметься та чому дорівнює час підйому t ? Через скільки часу t_1 тіло досягне висоти $h = H/2$?

1.11 М'яч падає з висоти $h_1 = 20$ м й відскакує на висоту $h_2 = 5$ м. Яка швидкість м'яча v_1 перед його зіткненням з поверхнею? Яка швидкість м'яча v_2 відразу після відскоку? Скільки часу пройшло з моменту початку його падіння до досягнення найвищої точки після відскоку?

1.12 Камінь падає з висоти $h = 1200$ м. Який шлях s пройде камінь за останню секунду свого падіння?

1.13 Завдяки опору повітря гранична швидкість падіння парашутиста з нерозкритим парашутом $v = 55$ м/с. З якої висоти h повинен падати парашутист, щоб досягти такої швидкості, якщо знехтувати опором повітря?

1.14 Ракета запускається зі сталим прискоренням $a = 16g$, де $g = 9,8$ м/с² – прискорення вільного падіння. Яку відстань s вона пролетить до моменту досягнення другої космічної швидкості $v = 11,2$ км/с?

1.15 Через час $t = 2$ с м'ячик упав на землю. Визначити висоту h балкона над землею й швидкість м'ячика v в момент удару об землю.

1.16 З повітряної кулі, що піднімається зі швидкістю $v_0 = 1$ м/с, падає камінь і досягає землі через $t = 16$ с. На якій висоті h перебувала куля в початковий момент падіння каменя?

1.17 Тіло починає падати зі швидкістю $v_0 = 15$ м/с, перебуваючи на висоті $h = 200$ м. Визначити, через який час t тіло досягне поверхні Землі, якщо початкова швидкість v_0 спрямована: а) вгору, б) вниз. Довести, що швидкість приземлення v в обох випадках однакова.

1.18 З вежі висотою $h = 25$ м горизонтально кинули камінь зі швидкістю $v_0 = 15$ м/с. Знайти: 1) скільки часу t камінь буде в русі; 2) на якій відстані s від основи вежі він упаде на землю; 3) швидкість каменя v в момент досягнення землі; 4) який кут φ утворить траєкторія каменя з горизонтом у точці його падіння; 5) рівняння траєкторії каменя $y = y(x)$.

1.19 Камінь кинули горизонтально зі швидкістю $v_0 = 5$ м/с. Знайти нормальне a_n і тангенціальне a_t прискорення каменя через $t = 3$ с після початку руху. Опір повітря не враховувати.

1.20 Камінь кинули горизонтально зі швидкістю $v_0 = 10$ м/с. Знайти радіус кривизни траєкторії каменя R через $t = 2$ с після початку руху. Опір повітря не враховувати.

1.21 Снаряд випущений із гармати під кутом $\alpha = 30^\circ$ до горизонту з початковою швидкістю $v_0 = 600$ м/с. Нехтуючи опором повітря, знайти дальність польоту снаряда s , максимальну висоту підйому h і радіус кривизни його траєкторії у верхній точці.

1.22 З якою швидкістю v повинен рухатися літак на екваторі зі сходу на захід, щоб пасажирам цього літака Сонце здавалося нерухомим на небі?

1.23 Знайти радіус R колеса, що обертається, якщо відомо, що лінійна швидкість v_1 в точці, що лежить на ободі колеса, у $k = 2,5$ разів більша лінійної швидкості v_2 точки, що знаходиться ближче до осі колеса $l = 5$ см.

1.24 Колесо, обертаючись рівноприскорено, досягло кутової швидкості $\omega = 20 \text{ рад/с}$, зробивши $N = 10$ обертів після початку обертання. Знайти кутове прискорення ε колеса.

1.25 Вентилятор обертається, роблячи $n_0 = 900$ об/хв. Після вимкнення двигуна вентилятор, обертаючись рівносповільнено, здійснив $N = 75$ обертів. Скільки часу t пройшло з моменту вимикання двигуна до повної зупинки вентилятора?

1.26 Колесо обертається з частотою $n_0 = 2$ об/с. Під дією сили тертя воно зупиняється через $t = 60$ с після відключення приводного двигуна, зробивши при цьому N обертів. Знайти N та кутове прискорення ε , з яким оберталося колесо під час гальмування.

1.27 Точка рухається по колу радіусом $R = 20$ см із сталим тангенціальним прискоренням $a_\tau = 5 \text{ см/с}^2$. Через скільки часу t після початку руху нормальне прискорення a_n точки буде: 1) дорівнювати тангенціальному; 2) удвічі більшим за тангенціальне?

1.28 Шлях, пройдений точкою по колу радіусом $R = 2$ м, виражається рівнянням $s = bt^2$. Знайти нормальне a_n , тангенціальне a_τ і повне прискорення a точки через $t = 0,5$ с після початку руху, якщо $b = 3 \text{ м/с}^2$.

1.29 Точка рухається по колу радіусом $R = 10$ см із сталим тангенціальним прискоренням a_τ . Знайти нормальне прискорення a_n точки через $t = 20$ с після початку руху, якщо відомо, що наприкінці п'ятого оберту після початку руху швидкість точки $v = 10 \text{ см/с}$.

1.30 Колесо радіусом $R = 10$ см обертається зі сталим кутовим прискоренням $\varepsilon = 3,14 \text{ рад/с}^2$. Знайти для точок на ободі колеса через $t = 1$ с після початку руху: 1) кутову швидкість ω ; 2) лінійну швидкість v ; 3) нормальне прискорення a_n ; 4) тангенціальне прискорення a_τ ; 5) повне прискорення a ; 6) кут

φ , що утворюється між напрямком повного прискорення і радіусом колеса.

1.31 Колесо обертається зі сталим кутовим прискоренням $\varepsilon = 2 \text{ рад/с}^2$. Через $t = 0,5 \text{ с}$ після початку руху повне прискорення точок обода колеса $a = 13,6 \text{ см/с}^2$. Знайти радіус колеса R .

1.2 Динаміка матеріальної точки

- Основне рівняння динаміки матеріальної точки:

$$\vec{F}_{\text{рез}} = \frac{d\vec{p}}{dt}, \quad (1.8)$$

де $\vec{F}_{\text{рез}}$ – результуюча сил, прикладених до точки; $\vec{p} = m\vec{v}$ – її імпульс.

Якщо маса m стала, то

$$\vec{F}_{\text{рез}} = m\vec{a}, \quad (1.8a)$$

де \vec{a} – прискорення точки.

- Сила тертя, що діє на тіло при його русі по деякій поверхні:

$$F_{\text{тер}} = \mu N, \quad (1.9)$$

де N – сила нормального тиску на цю поверхню, μ – коефіцієнт тертя.

- Сила пружності, що виникає в пружині при її пружній деформації (закон Гука):

$$F_{\text{пр}} = -kx, \quad (1.10)$$

де k – жорсткість, x – видовження пружини.

- Робота сили F при переміщенні тіла по шляху s :

$$A = \int_s F_s ds, \quad (1.11)$$

де F_s – проекція сили на напрямок переміщення.

У випадку сталої сили F , що діє на тіло під незмінним кутом α до переміщення:

$$A = Fs \cos \alpha. \quad (1.12)$$

- Кінетична енергія матеріальної точки масою m , що рухається зі швидкістю v :

$$W_k = \frac{mv^2}{2}. \quad (1.13)$$

- Кінетична енергія пов'язана з роботою співвідношенням

$$A = W_{k2} - W_{k1} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}. \quad (1.14)$$

- Потенціальна енергія тіла в полі тяжіння Землі:

$$W_n = mgh, \quad (1.15)$$

де $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння, h – висота над Землею.

- Потенціальна енергія пружно деформованої пружини:

$$W_n = \frac{kx^2}{2}. \quad (1.16)$$

1.32 Поїзд масою $m = 5 \cdot 10^5 \text{ кг}$ рухається рівносповільнено. Його швидкість зменшується при цьому протягом часу $\Delta t = 1 \text{ хв}$ від $v_1 = 40 \text{ км/год}$ до $v_2 = 28 \text{ км/год}$. Знайти силу гальмування F .

1.33 Поїзд масою $m = 5 \cdot 10^5 \text{ кг}$ після припинення тяги локомотива під дією сили тертя $F_{\text{тер}} = 9,8 \cdot 10^4 \text{ Н}$ зупиняється протягом часу $t = 1 \text{ хв}$. З якою швидкістю v рухався поїзд?

1.34 Три тіла масами $m_1 = 1 \text{ кг}$, $m_2 = 2 \text{ кг}$ і $m_3 = 3 \text{ кг}$ мають змогу вільно рухатися без тертя по горизонтальній поверхні столу. Тіла зв'язані нитками в ланцюг, і до першого з них

прикладена сила $F = 20$ Н. Знайти прискорення a , з яким будуть рухатися тіла, і сили натягу ниток T_1 й T_2 .

1.35 Дерев'яний брусок масою $m_1 = 350$ г, що знаходиться на гори-зонтальній поверхні, прив'язано до нитки, яка перекинута через блок. Іншим кінцем нитка прикріплена до тягарця масою $m_2 = 265$ г (рисунок 1.1). Нехтуючи тертям, визначити прискорення системи a та силу натягу нитки T .

1.36 Два тіла масами m_1 й m_2 з'єднані ниткою, перекинutoю через невагомий блок (рисунок 1.2). Такий пристрій називається машиною Атвуда. Знайти прискорення a , з яким будуть рухатися тіла, і силу натягу нитки T , якщо маси тіл $m_1 = 1$ кг, $m_2 = 1,1$ кг.

1.37 На брусок масою $m = 5$ кг в горизонтальному напрямку діє сила $F = 20$ Н. Знайти прискорення a , з яким буде рухатися брусок, якщо коефіцієнт тертя бруска на горизонтальній поверхні $\mu = 0,1$.

1.38 Визначити, з якою швидкістю v рухався автомобіль, якщо довжина сліду коліс при гальмуванні $l = 25$ м. Коефіцієнт тертя коліс об покриття дороги $\mu = 0,3$.

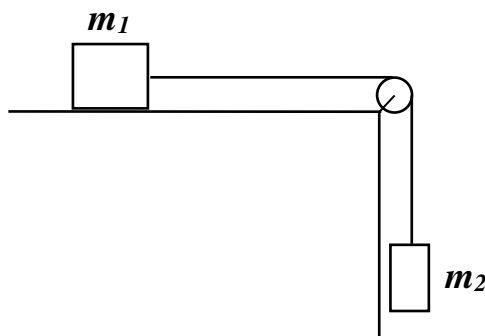


Рисунок 1.1

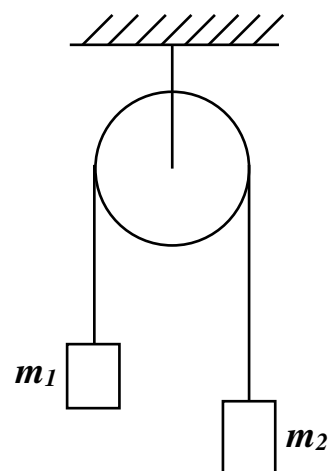


Рисунок 1.2

1.39 Дерев'яний брусок масою $m_1 = 350$ г, що перебуває на горизонтальній поверхні, прив'язаний до нитки, перекинutoї через блок. Іншим кінцем нитка прикріплена до тягарця масою $m_2 = 265$ г (див. рисунок 1.1). Визначити прискорення системи a й силу натягу нитки T , якщо коефіцієнт тертя бруска об горизонтальну поверхню $\mu = 0,45$.

1.40 Протягом часу $\Delta t = 2$ с на тіло діє сила $F = 20$ Н. Чому дорівнює збільшення імпульсу тіла Δp ?

1.41 При вертикальному підйомі тягарця масою $m = 2$ кг на висоту $h = 1$ м сталою силою F було виконано роботу $A = 80$ Дж. З яким прискоренням a піднімали тягарець?

1.42 Яку роботу A слід виконати, щоб рухоме тіло масою $m = 2$ кг: 1) збільшило свою швидкість від $v_1 = 2$ м/с до $v_2 = 5$ м/с; 2) зупинилося при початковій швидкості $v_1 = 3$ м/с?

1.43 М'яч летить зі швидкістю $v_1 = 15$ м/с і відбивається ударом ракетки в протилежному напрямку зі швидкістю $v_2 = 20$ м/с. Знайти зміну імпульсу м'яча Δp , якщо відомо, що зміна кінетичної енергії м'яча при цьому дорівнює $\Delta W_k = 8,75$ Дж.

1.44 Камінь, пущений по поверхні льоду зі швидкістю $v = 2$ м/с, пройшов до повної зупинки відстань $s = 20,4$ м. Знайти коефіцієнт тертя каменя об лід μ , вважаючи його постійним.

1.45 З вежі висотою $h = 25$ м горизонтально кинута камінь зі швидкістю $v_0 = 15$ м/с. Знайти кінетичну W_k та потенціальну енергію W_n каменя через $t = 1$ с після початку руху. Маса каменя $m = 0,2$ кг. Опором повітря знехтувати.

1.46 Кулька масою $m = 100$ г підвішена на нитці, здатній витримати вагу двох таких кульок. На який максимальний кут α_{max} можна відхилити кульку на нитці, щоб при проходженні нею положення рівноваги нитка не розірвалася?

1.47 При забиванні палі в землю молотом масою $m = 100$ кг, що рухається зі швидкістю $v = 10$ м/с, земля чинить опір проникненню із силою $F_{on} = 50$ кН. Знайти, на скільки заглиблюється паля з кожним ударом. Яка середня потужність $P_{сер}$ при одному ударі? Втратою енергії на нагрівання знехтувати.

1.48 Вільна пружина довжиною $l_0 = 10$ см розтягується до довжини $l_1 = 12$ см, при цьому прикладено силу $F_1 = 120$ Н. Яка робота A здійснюється над пружиною?

1.49 Сила, що діє на тіло, зростає пропорційно квадрату відстані x від початкової точки: $F = bx^2$. На скільки збільшиться потенційна енергія тіла при його переміщенні із точки $x = 0$ в точку $x = x_0$?

1.50 Вагон масою $m = 4 \cdot 10^4$ кг, що рухається зі швидкістю $v = 2$ м/с, наприкінці запасного шляху вдаряється об пружинний амортизатор. На скільки він стисне пружину амортизатора, коефіцієнт жорсткості якої $k = 2,25 \cdot 10^5$ Н/м?

1.51 Потенційна енергія тіла залежить від координат відповідно до відношення $W_n = A/r^2$, де $A = const$, $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$. Знайти компоненти вектора сили F_x , F_y , F_z , що діє на тіло.

1.52 Знайти вектор сили \vec{F} , що діє на тіло, якщо його потенціальну енергію задано рівнянням $W_n = xe^{-y} + ye^{-x}$.

1.53 З рушниці масою $m_1 = 5$ кг вилітає куля масою $m_2 = 5$ г зі швидкістю $v_2 = 200$ м/с. Знайти швидкість віддачі рушниці v_1 .

1.54 Тіло масою $m_1 = 1$ кг, що рухається зі швидкістю $v_1 = 2$ м/с, непружно співударяється з нерухомим тілом масою $m_2 = 10$ кг. Знайти швидкість тіл v після зіткнення й втрату кінетичної енергії ΔW_k при зіткненні.

1.55 З гармати масою $m_1 = 5000$ кг вилітає снаряд масою $m_2 = 100$ кг. Кінетична енергія снаряда при вильоті $W_k = 7,5 \cdot 10^6$ Дж.

Яку частку від цієї енергії становить кінетична енергія гармати, отримана внаслідок віддачі? Чому дорівнює ця енергія?

1.56 Ковзаняр масою $m_1 = 70$ кг, стоячи на льоду, кидає горизонтально камінь масою $m_2 = 1$ кг зі швидкістю $v_2 = 10$ м/с. На яку відстань відкотиться при цьому ковзаняр, якщо коефіцієнт тертя ковзанів об лід $\mu = 0,02$?

1.57 Тіло масою $m = 3$ кг рухається зі швидкістю $v = 2$ м/с та співударяється з нерухомим тілом тієї ж маси. Вважаючи удар центральним та непружним, визначити кількість теплоти Q , що виділилася під час удару.

1.58 Куля, що летить горизонтально, попадає в тіло сферичної форми, підвішене на дуже легкому твердому стрижні, і застряє в ньому. Маса кулі в 1000 разів менша маси тіла. Відстань від точки підвісу стрижня до центра кулі $l = 1$ м. Знайти швидкість кулі v , якщо відомо, що стрижень із кулею відхилився від удару кулі на кут $\alpha = 10^\circ$ (Такий пристрій називається балістичним маятником і використовується на практиці для вимірювання швидкості куль).

1.59 Маса балістичного маятника (див. попереднє завдання) $m_1 = 0,5$ кг, маса кулі $m_2 = 5$ г, а її швидкість $v = 500$ м/с. При якій граничній довжині стрижня l_{max} (відстані від точки підвісу до центра сфери) тягарець маятника від удару кулі підніметься до верхньої точки кола?

1.60 Дві кульки масами $m_1 = 5$ г та $m_2 = 10$ г співударяються. Удар - лобовий центральний, абсолютно пружний. Знайти швидкості кульок u_1 і u_2 після зіткнення, якщо до зіткнення швидкість першої з них була $v_1 = 10$ см/с, а друга перебувала у стані спокою.

1.61 Нейтрон масою m_n співударяється з нерухомим ядром атома карбону масою $m_c = 12m_n$. Вважаючи удар центральним і пружним, знайти, у скільки разів зменшується кінетична енергія W_k нейтрона при ударі.

1.3 Обертальний рух твердого тіла

- Момент сили F відносно деякої осі:

$$M = F \cdot l, \quad (1.17)$$

де l – відстань від цієї осі до лінії дії сили (плече сили).

- Основне рівняння динаміки обертального руху для тіла, закріпленого на осі:

$$M_z = I_z \varepsilon, \quad (1.18)$$

де M_z – проекція моменту сили на вісь, I_z – момент інерції тіла відносно цієї осі.

- Момент імпульсу тіла, закріпленого на осі:

$$L_z = I_z \omega. \quad (1.19)$$

- Моменти інерції тіл масою m і радіусом R відносно їх геометричних осей:

- циліндра (диска) $I = \frac{1}{2} mR^2, \quad (1.20)$

- обруча $I = mR^2, \quad (1.21)$

- кулі $I = \frac{2}{5} mR^2. \quad (1.22)$

- Момент інерції однорідного стрижня відносно перпендикулярної йому осі, що проходить через центр мас:

$$I = \frac{1}{12} ml^2, \quad (1.23)$$

де l – довжина стрижня, m – його маса.

- Теорема Штейнера:

$$I = I_0 + md^2, \quad (1.24)$$

де I – момент інерції тіла відносно деякої осі, I_0 – момент інерції тіла відносно осі, що паралельна даній осі, віддалена від неї на відстань d і проходить через центр мас тіла; m – маса тіла.

- Кінетична енергія обертального руху твердого тіла:

$$W_k = \frac{I\omega^2}{2}. \quad (1.25)$$

1.62 Однорідний стрижень масою $m = 1$ кг й довжиною $l = 1$ м закріплений на осі, яка перпендикулярна стрижню. Вісь проходить через точку, яка знаходиться на відстані $x = 0,4$ м від кінця стрижня. Чому дорівнює момент інерції стрижня відносно цієї осі?

1.63 Визначити момент інерції циліндричної муфти відносно її осі симетрії. Маса муфти $m = 0,1$ кг, внутрішній діаметр $D_1 = 1$ см, зовнішній діаметр $D_2 = 2$ см.

1.64 Визначити момент інерції кульки масою $m = 0,01$ кг й радіусом $R = 2$ см відносно осі, дотичної до його поверхні.

1.65 До обода однорідного диска радіусом $R = 25$ см прикладена дотична сила $F = 5$ Н. Знайти масу диска m , якщо відомо, що диск обертається з кутовим прискоренням $\varepsilon = 4$ рад/с².

1.66 До обода колеса радіусом $R = 35$ см і масою $m = 10$ кг прикладена дотична сила $F = 25$ Н. Знайти кутове прискорення ε колеса. Через який час t після початку дії сили колесо буде мати частоту обертання $n = 20$ об/с? Колесо вважати однорідним диском. Тертям знехтувати.

1.67 Маховик, момент інерції якого $I = 60 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, обертається з кутовою швидкістю $\omega = 30 \text{ рад/с}$. Знайти момент сили тертя $M_{\text{тр}}$, під дією якого маховик зупиниться через $t = 20 \text{ с}$ після вимкнення приводного двигуна.

1.68 Вал масою $m = 100 \text{ кг}$ і радіусом $R = 5 \text{ см}$ обертається з частотою $n = 10 \text{ об/с}$. До циліндричної поверхні вала притиснули гальмівну колодку із силою $F = 40 \text{ Н}$, під дією якої вал зупинився після $t = 20 \text{ с}$. Визначити коефіцієнт тертя μ колодки об вал.

1.69 На барабан масою $m_1 = 30 \text{ кг}$ намотаний шнур, до кінця якого прив'язаний тягарець масою $m_2 = 1 \text{ кг}$. Нехтуючи тертям, знайти прискорення тягарця. Барабан вважати однорідним циліндром.

1.70 В машині Атвуда (див. завдання 1.36, рисунок 1.2) маси тягарців $m_1 = 1 \text{ кг}$, $m_2 = 1,1 \text{ кг}$. Знайти прискорення a , з яким будуть рухатися тягарці, і сили натягу ниток T_1 й T_2 , якщо маса блока $m = 2 \text{ кг}$. Блок вважати однорідним циліндром.

1.71 Горизонтальна платформа масою $m_0 = 500 \text{ кг}$ обертається навколо вертикальної осі, що проходить через центр платформи, роблячи $n_1 = 5 \text{ об/хв}$. Людина масою $m = 80 \text{ кг}$ стоїть при цьому на краю платформи. З якою частотою n_2 буде обертатися платформа, коли людина перейде від краю платформи до її центра? Платформу вважати однорідним диском, а людину – матеріальною точкою.

1.72 Яку роботу A виконує людина при переході від краю платформи до її центра в умовах попереднього завдання? Радіус платформи $R = 2 \text{ м}$.

1.73 Куля масою $m = 5 \text{ г}$ летить зі швидкістю $v = 200 \text{ м/с}$ і вдаряється об виступ нерухомого зубчастого колеса, момент інерції якого $I = 0,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Відстань від точки влучення кулі до осі обертання $R = 30 \text{ см}$. Визначити кутову швидкість колеса ω , з якою колесо почне обертатися, вважаючи удар непружним. Куля

рухалася в площині обертання колеса.

1.74 Людина обертається на лаві Жуковського з кутовою швидкістю $\omega_1 = 2 \text{ с}^{-1}$ і тримає у витягнутих руках по гантелі масою $m = 3 \text{ кг}$ кожна. Власний момент інерції людини $I_0 = 4 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, відстань від осі обертання до гантелі $r_1 = 0,6 \text{ м}$. Людина притискає руки до тулуба так, що ця відстань стає рівною $r_2 = 0,3 \text{ м}$. Знайти кутову швидкість обертання людини ω_2 в другому положенні й збільшення ΔW_k його кінетичної енергії обертання. За рахунок чого ця енергія збільшилася?

1.75 Маховик, який є однорідним диском діаметром $D = 40 \text{ см}$ і масою $m = 25 \text{ кг}$, обертається навколо своєї осі і має кінетичну енергію $W_k = 10^4 \text{ Дж}$. З якою кутовою швидкістю ω він обертається і чому дорівнює доцентрове прискорення $a_{доц}$ точок на ободі маховика?

1.76 Сферичне тіло масою $m = 1 \text{ кг}$ й радіусом $R = 0,1 \text{ м}$ приводиться до обертання навколо осі, що проходить через її центр. При цьому кут повороту тіла залежить від часу за законом $\varphi = Bt^2$, де $B = 0,5 \text{ рад/с}^2$. Визначити кінетичну енергію кулі через $t = 10 \text{ с}$ після початку руху.

1.77 До обода диска масою $m = 5 \text{ кг}$ прикладена дотична сила $F = 20 \text{ Н}$. Яку кінетичну енергію W_k буде мати диск через $t = 5 \text{ с}$ після початку дії сили?

1.78 Циліндр котиться по горизонтальній площині. Яку частину складає енергія обертового руху $W_{об}$ від загальної кінетичної енергії W_k ?

1.79 Сферичне тіло масою $m = 1 \text{ кг}$ котиться по горизонтальній поверхні зі сталою швидкістю $v = 2 \text{ м/с}$. Знайти кінетичну енергію тіла W_k . Який шлях s пройде тіло вгору по похилій площині, розташованій під кутом $\alpha = 30^\circ$ до горизонту?

1.80 Сферичне тіло масою $m = 1 \text{ кг}$ котиться без ковзання,

ударяється об стінку й відскакує від неї. Швидкість тіла до удару об стінку $v_1 = 10$ см/с, після удару $v_2 = 8$ см/с. Знайти кількість теплоти Q , що виділилася під час удару?

1.81 Циліндр скачується з похилої площини, розташованої під кутом $\alpha = 10^\circ$ до горизонту. Знайти прискорення циліндра a . Як зміниться це прискорення, якщо замість суцільного циліндра взяти порожнистий циліндр тієї ж маси й того ж радіуса?

1.82 Циліндр масою $m = 1$ кг й радіусом $R = 0,1$ м скочується без ковзання з похилої площини висотою $h = 0,2$ м і довжиною $l = 1$ м. Знайти прискорення a , з яким рухається циліндр, швидкість v поступального руху циліндра і його кінетичну енергію W_k біля «підніжжя» похилої площини.

1.83 Сферичне тіло та суцільний циліндр, рухаючись із однаковими швидкостями, вкочуються нагору по похилій площині. Яке з тіл підніметься вище? Знайти відношення висот підйому.

1.84 Скільки часу буде скочуватися обруч із похилої площини довжиною $l = 2$ й висотою $h = 0,5$ м? Ковзання відсутнє.

1.85 Однорідний стрижень масою $m = 100$ г й довжиною $l = 50$ см може обертатися навколо горизонтальної осі, що проходить через один з його кінців. Знайти швидкість другого кінця стрижня в момент проходження ним положення рівноваги, якщо спочатку стрижень був відхилений від цього положення на кут $\alpha = 90^\circ$, а потім відпущений без початкової швидкості. Яка кінетична енергія стрижня?

1.86 Олівець, поставлений вертикально, падає на стіл. Яку кутову й лінійну швидкість буде мати наприкінці падіння верхній кінець олівця? Довжина олівця $l = 15$ см.

1.4 Релятивістська механіка (спеціальна теорія відносності)

- Довжина тіла l в напрямку руху щодо нерухомого спостерігача:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad (1.26)$$

де l_0 – довжина цього тіла в стані спокою, v – його швидкість, c – швидкість світла ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с).

- Проміжок часу Δt за годинником спостерігача, що рухається зі швидкістю v щодо нерухомого спостерігача:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (1.27)$$

де Δt_0 – проміжок часу за годинником нерухомого спостерігача.

- Імпульс тіла масою m :

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (1.28)$$

- Кінетична енергія тіла в релятивістській механіці:

$$W_k = mc^2 \left(\frac{l}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - l \right). \quad (1.29)$$

- Енергія, що виділяється в ядерних реакціях при зменшенні маси речовини на Δm :

$$\Delta W = \Delta m \cdot c^2. \quad (1.30)$$

- Релятивістський закон додавання швидкостей:

$$u_x = \frac{u_x' + v}{1 + \frac{u_x' v}{c^2}}, \quad (1.31)$$

де u_x – швидкість тіла в нерухомій системі відліку; u_x' – швидкість у системі відліку, що рухається щодо нерухомої системи зі швидкістю v в напрямку осі x .

1.87 Яку швидкість повинне мати тіло, що рухається, щоб його поздовжні розміри зменшилися в $n = 2$ рази?

1.88 У скільки разів збільшується тривалість існування нестабільної частки (за годинником нерухомого спостерігача), якщо вона починає рухатися зі швидкістю $v = 0,99 \cdot c$, де c – швидкість світла?

1.89 Мезон, що входить до складу космічних променів, рухається зі швидкістю $v = 0,95 \cdot c$ (c – швидкість світла). Який проміжок часу Δt за годинником земного спостерігача відповідає проміжку $\Delta t_0 = 1$ с “власного часу“ мезона?

1.90 Знайти швидкість мезона v , якщо його повна енергія в 10 разів більше енергії спокою $W = 10 \cdot W_0$.

1.91 Яку частку швидкості світла становить швидкість протона з кінетичною енергією $W_k = 6 \cdot 10^{11}$ еВ? ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж). Маса протона $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27}$ кг.

1.92 Знайти швидкість частинки v , якщо її кінетична енергія $W_k = 0,5 W_0$, де W_0 – енергія спокою частинки.

1.93 Яку роботу A треба виконати, щоб збільшити швидкість електрона масою $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг від $v_1 = 0,6 \cdot c$ до $v_2 = 0,8 \cdot c$, де $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла? Порівняти отриманий результат зі значенням, обчисленим за класичною формулою.

1.94 При діленні ядра урану ^{235}U звільняється енергія $W \approx 200$ МеВ. Знайти зменшення маси речовини ^{235}U Δm , що відбувається при діленні одного кіломоля урану.

1.95 Сонце випромінює щохвилини енергію $W = 6,5 \cdot 10^{21}$ кВт·год. Вважаючи випромінювання Сонця постійним, знайти, за який час Δt маса Сонця $M = 1,97 \cdot 10^{30}$ кг зменшиться в $n = 2$ разів?

1.96 Показати, що квант світла, випромінюваний у напрямку Землі зі швидкістю c зіркою, яка рухається до Землі зі швидкістю v , наближається до Землі не зі швидкістю $c + v$, а зі швидкістю c (c – швидкість світла).

2 Коливання та хвилі

2.1 Механічні коливання

- Рівняння гармонічних коливань матеріальної точки:

$$x = A \cos(\omega_0 t + \alpha_0), \quad (2.1)$$

де x – зміщення точки від положення рівноваги, A – амплітуда коливань, $\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$ – циклічна частота коливань (число повних коливань за 2π секунд), $T = \frac{1}{\nu}$ – період, ν – частота, α_0 – початкова фаза коливань.

- Повертальна сила, під дією якої тіло, закріплене на пружині (пружинний маятник), здійснює гармонічні коливання:

$$F_{\text{іа}} = -kx, \quad (2.2)$$

де k – жорсткість пружини.

- Період коливань пружинного маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (2.3)$$

де m – маса тіла.

- Період коливань математичного маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (2.4)$$

де l – довжина математичного маятника, g – прискорення вільного падіння.

- Період коливань фізичного маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_z}{mgl}}, \quad (2.5)$$

де m – маса маятника, I_z – його момент інерції відносно осі Z , l – відстань від осі обертання до центра маси тіла.

- Рівняння згасаючих коливань:

$$x = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega_0 t + \alpha_0), \quad (2.6)$$

де β – коефіцієнт згасання, $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ – циклічна частота затухаючих коливань, A_0 – початкова амплітуда.

- Логарифмічний декремент згасання:

$$\chi = \beta T = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)}, \quad (2.7)$$

де $A(t) = A_0 e^{-\beta t}$ – амплітуда згасаючих коливань в момент часу t .

- Енергія гармонічних коливань:

$$W = W_e + W_n = \frac{m v^2}{2} + \frac{k x^2}{2} = \frac{m \omega_0^2 A^2}{2}. \quad (2.8)$$

2.1 Кулька, підвішена на довгій нитці, здійснює одне повне коливання за час $T = 1$ с. Визначити довжину нитки.

2.2 Кулька підвішена на довгій нитці. Один раз її піднімають по вертикалі до точки підвісу, інший раз - відхиляють, як

маятник, на невеликий кут. У якому з цих випадків кулька швидше повернеться до початкового положення, якщо її відпустити?

2.3 На тонкій нитці завдовжки $l = 0,5$ м підвішена куля радіусом $R = 5$ см. Знайти відносну погрішність у визначенні періоду коливань T , якщо маятник вважати за математичний.

2.4 Мідна кулька, підвішена на пружині, здійснює вертикальні гармонічні коливання. Як зміниться період коливань, якщо до пружини замість мідної кульки підвісити алюмінієву в $n = 2$ рази більшого радіуса? Густина міді $\rho_{Cu} = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, густина алюмінію $\rho_{Al} = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

2.5 Визначити момент інерції тіла масою $m = 40$ кг, що здійснює гармонічні коливання з періодом $T = 3,14$ с, якщо відстань від точки підвісу до центра тяжіння $l = 1$ м.

2.6 Стрижень завдовжки $l = 14,7$ см закріплений на горизонтальній осі, що проходить через один з його кінців. Знайти період малих коливань стрижня навколо цієї осі.

2.7 Маятником є довгий стрижень масою $m_1 = 0,01$ кг і довжиною $l = 1$ м, до кінця якого прикріплена маленька кулька масою $m_2 = 0,05$ кг. Знайти період малих коливань такого маятника.

2.8 Маятник складається з дуже легкого стрижня, здатного обертатися навколо перпендикулярної стрижню горизонтальної осі, на кінцях якого закріплено два однакові тягарці - один на відстані $r_1 = 15$ см від осі, інший на відстані $r_2 = 30$ см від осі. Який період малих коливань такого маятника?

2.9 Рівняння коливань точки має вигляд $x = x_0 \sin \omega t$. Виразити прискорення точки через x_0 , ω і t .

2.10 Амплітуда гармонічних коливань точки $A = 50$ мм, період $T = 4$ с, початкова фаза $\alpha = \pi/4$. Написати рівняння цих коливань та визначити зміщення x точки від положення

рівноваги в моменти часу $t_1 = 0$ та $t_2 = 1,5$ с. Зобразити графік функції $x = x(t)$.

2.11 Матеріальна точка здійснює гармонічні коливання, амплітуда яких $A = 10$ см. Максимальна швидкість точки $v_{max} = 20$ м/с. Написати рівняння коливань точки та знайти її максимальне прискорення a_{max} , якщо в початковий момент часу $t = 0$ зміщення точки від положення рівноваги $x(0) = 5$ см.

2.12 Матеріальна точка масою $m = 10$ г здійснює гармонічні коливання, рівняння яких має вигляд $x = A \sin 8\pi t$. Знайти повертаючу силу, яка діє на точку в момент $t_1 = 0,1$ с, а також повну енергію коливань W , якщо $A = 0,02$ м.

2.13 Матеріальна точка масою $m = 10$ г здійснює гармонічні коливання, рівняння яких має вигляд $x(t) = 5 \sin(\pi t / 5 + \pi / 4)$ (м). Знайти максимальну силу F_{max} , яка діє на точку, та повну енергію коливань точки W .

2.14 Матеріальна точка масою $m = 10$ г здійснює гармонічні коливання з амплітудою $A = 5$ см, періодом $T = 4$ с та початковою фазою $\varphi_0 = 0$. Визначити максимальну швидкість тіла v_{max} , максимальну силу F_{max} , яка діє на тіло, та прискорення тіла a в момент $t_1 = 2$ с.

2.15 Тіло масою $m = 0,5$ кг рухається так, що залежність пройденого шляху від часу визначається рівнянням $s = A \sin \omega t$, де $A = 5$ см, $\omega = \pi$ рад/с. Знайти силу F , яка діє на тіло в момент $t_1 = 0,5$ с, та швидкість тіла v в момент $t_2 = 2$ с.

2.16 Тіло рухається під дією сили $F = F_0 \cos \omega t$ за законом $x = x_0 \sin \omega t$. Знайти роботу сили A : 1) за час від $t = t_1$ до $t = t_2$; 2) за один період T дії сили. Визначити потужність P за цей період.

2.17 Точка здійснює гармонічні коливання. Визначити відношення кінетичної енергії точки W_k до її потенціальної енергії W_n для моментів часу, коли зміщення точки від

положення рівноваги: $x_1 = \frac{A}{4}$, $x_2 = \frac{A}{2}$, $x_3 = A$, де A – амплітуда коливань.

2.18 Додаються два коливання, однакові за напрямком: $x_1 = \sqrt{3} \cos \pi t$ (м) та $x_2 = \cos(\pi t + \frac{\pi}{2})$ (м). Визначити амплітуду і початкову фазу результуючого коливання. Написати рівняння цього коливання. Побудувати векторну діаграму додавання коливань.

2.19 Додаються два гармонічні коливання одного напрямку й однакової частоти; їх амплітуди $A_1 = 3$ см і $A_2 = 4$ см. Одержується гармонічне коливання амплітудою $A = 5$ см. Знайти різницю фаз коливань, які додавались.

2.20 Матеріальна точка бере участь у двох взаємно перпендикулярних коливаннях, які виражені рівняннями: $x(t) = 2 \cos(\pi t / 2)$ (м) і $y(t) = -\cos \pi t$ (м). Знайти рівняння траєкторії точки $y = y(x)$.

2.21 Знайти рівняння траєкторії руху точки, яка бере участь у двох взаємно перпендикулярних коливаннях, виражених рівняннями: $x(t) = 2 \sin \omega t$ (і) і $y(t) = 2 \cos \omega t$ (і).

2.22 Логарифмічний декремент згасання коливань математичного маятника $\chi = 0,2$. У скільки разів зменшиться амплітуда коливань за $n = 10$ повних коливань маятника?

2.23 Початкова амплітуда коливань маятника $A_0 = 20$ см, амплітуда після $n = 10$ повних коливань $A_n = 1$ см. Визначити логарифмічний декремент згасання χ і коефіцієнт згасання β знаючи, що період коливань маятника $T = 5$ с. Написати рівняння коливань.

2.24 За час $t_1 = 1$ хв амплітуда коливань маятника зменшилась у 2 рази. У скільки разів зменшиться амплітуда за час $t_2 = 3$ хв ?

2.25 Знайти логарифмічний декремент згасання χ математичного маятника довжиною $l = 50$ см, якщо за час $t = 8$ хв його енергія коливань зменшиться на 99 %.

2.26 За який час t енергія коливань W камертона з частотою $\nu = 600$ Гц зменшиться в $n = 10^6$ разів, якщо логарифмічний декремент згасання $\chi = 8 \cdot 10^{-4}$?

2.27 При якій швидкості потяга v ресори його вагонів будуть мати максимальну амплітуду коливань (під дією поштовхів коліс зі стиками залізничних рейок), якщо довжина рейок $l = 12,5$ м, навантаження на ресору $F = 5,5$ кН і ресора прогинається на $x_l = 16$ мм при навантаженні $F_l = 1$ кН?

2.2 Хвилі в пружному середовищі

- Рівняння біжучої хвилі:

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega t - k x), \quad (2.9)$$

де $\xi(x, t)$ – зміщення від положення рівноваги точки середовища, яка віддалена від джерела коливань на відстань x в момент часу t , $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число, λ – довжина хвилі.

- Зв'язок довжини хвилі з частотою:

$$\lambda = \frac{v}{\nu}. \quad (2.10)$$

- Швидкість хвилі в пружному середовищі:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2.11)$$

де ρ – густина середовища, E – модуль Юнга середовища.

• Енергія, яку переносить хвиля за одиницю часу через перпендикулярну напрямку хвилі одиничну площадку (вектор Умова):

$$\vec{j} = w \cdot \vec{v}, \quad (2.12)$$

де $w = \frac{\rho \omega^2 A^2}{2}$ – об'ємна густина енергії.

2.28 Мінімальна та максимальна частоти коливань, що сприймаються людиною як звук, становлять відповідно $\nu_{min} = 20$ Гц та $\nu_{max} = 20$ кГц. Які довжини хвиль відповідають цим частотам у повітрі? Швидкість звуку у повітрі 330 м/с.

2.29 Звукові коливання, які мають частоту $\nu = 500$ Гц та амплітуду $A = 0,25$ мм, розповсюджуються у повітрі. Довжина хвилі $\lambda = 70$ см. Знайти швидкість розповсюдження коливань v та максимальну швидкість частинок повітря.

2.30 Коливання джерела описуються рівнянням $\xi(0, t) = 4 \sin 600\pi t$ см. Швидкість розповсюдження коливань в середовищі $v = 300$ м/с. Знайти зміщення ξ_1 від положення рівноваги точки, яка розташована на відстані $x_1 = 75$ см від джерела через $t_1 = 0,01$ с після початку коливань.

2.31 Знайти зміщення від положення рівноваги точки, яка розташована на відстані $x_1 = \lambda/12$, для моменту часу $t_1 = T/6$, де λ – довжина хвилі, T – період коливань джерела. Амплітуда коливань $A = 0,05$ м.

2.32 Зміщення від положення рівноваги точки, яка знаходиться на відстані $x = 4$ см від джерела коливань, в момент $t = T/6$ дорівнює половині амплітуди $\xi(x, t) = A/2$. Знайти довжину хвилі λ .

2.33 Знайти модуль Юнга металу E , якщо швидкість звуку в металі $v = 4700$ м/с, а його густина $\rho = 8,6 \cdot 10^3$ кг/м³.

2.34 Амплітуда поздовжньої хвилі в деякому середовищі $A = 0,1$ мм, частота коливань $\nu = 50$ Гц. Густина середовища $\rho = 7,9 \cdot 10^3$ кг/м³, а його модуль пружності $E = 10^5$ Па. Знайти густину потоку енергії j , що переноситься цією хвилею.

3 Молекулярна фізика і термодинаміка

3.1 Основи молекулярно-кінетичної теорії

- Рівняння стану ідеального газу (Клапейрона-Менделєєва):

$$pV = \frac{m}{M}RT, \quad (3.1)$$

де p – тиск, V – об'єм, T – абсолютна температура, m – маса газу, M – його молярна маса, R – універсальна газова стала.

Це рівняння можна привести до вигляду:

$$p = nkT, \quad (3.2)$$

де $k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж / К - стала Больцмана, $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹

¹ – число Авогадро, $n = \frac{N}{V}$ – кількість молекул в одиниці об'єму (концентрація молекул).

- Розподіл молекул ідеального газу за швидкостями (*розподіл Максвелла*):

$$f(v) = \frac{\Delta N}{N \cdot \Delta v} = 4\pi v^2 \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}}, \quad (3.3)$$

де ΔN – число молекул, які мають швидкості в інтервалі від v до $v + \Delta v$; N – загальне число молекул; $m_0 = \frac{M}{N_A}$ – маса молекули.

- Найбільш імовірна швидкість молекул газу:

$$v_{\text{імовірна}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}. \quad (3.4)$$

- Середня арифметична швидкість молекул газу:

$$v_{\text{середня}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}. \quad (3.5)$$

- Середня квадратична швидкість молекул газу:

$$v_{кв} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}. \quad (3.6)$$

- Середня довжина вільного пробігу молекули :

$$\bar{\lambda} = \frac{l}{\sqrt{2}\pi d^2 n}, \quad (3.7)$$

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

- Середнє число зіткнень молекули за секунду:

$$\bar{z} = \frac{v_{с\grave{a}p}}{\bar{\lambda}} = \sqrt{2}\pi d^2 n v_{с\grave{a}p}. \quad (3.8)$$

- Коефіцієнт дифузії газу:

$$D = \frac{1}{3} \bar{\lambda} v_{с\grave{a}p}. \quad (3.9)$$

- Коефіцієнт теплопровідності газу:

$$\chi = \frac{1}{3} \bar{\lambda} v_{с\grave{a}p} \rho c_v, \quad (3.10)$$

де $\rho = m/V$ – густина газу, $c_v = \frac{C_v}{M}$ – питома теплоємність газу при сталому об'ємі (C_v – молярна теплоємність).

- Коефіцієнт в'язкості газу:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \bar{\lambda} v_{с\grave{e}p}. \quad (3.11)$$

- Розподіл Больцмана молекул ідеального газу в полі тяжіння Землі:

$$n(h) = n_0 e^{-\frac{mgh}{kT}} = n_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}}, \quad (3.12)$$

де h – висота, відрахована від земної поверхні.

3.1 Знайти число молекул N в об'ємі $V = 1 \text{ см}^3$ і густину ρ азоту при тиску $p = 2 \text{ нПа}$ та температурі $t = 15^\circ \text{C}$. Молярна маса азоту $M = 0,028 \text{ кг/моль}$.

3.2 Яку кількість молекул N вміщує водень масою $m = 1 \text{ г}$? Вода масою $m = 1 \text{ г}$? Молярна маса води $M = 0,018 \text{ кг/моль}$, водню – $M = 0,002 \text{ кг/моль}$.

3.3 Найкращий вакуум, який досягнуто в земних умовах, відповідає тиску $p = 10^{-14} \text{ мм рт. ст.}$ Яка кількість молекул N залишиться у цьому вакуумі в об'ємі $V = 1 \text{ см}^3$ при температурі $T = 300 \text{ К}$? (Вакуум зіркового простору відповідає приблизно одному протону в 1 см^3).

3.4 Визначити число N молекул азоту, які знаходяться за нормальних умов в об'ємі $V = 1 \text{ см}^3$ і мають швидкості: а) між 99 та 101 м/с; б) між 499 та 501 м/с.

3.5 Знайти температуру T кисню, при якій швидкостям молекул $v_1 = 250 \text{ м/с}$ і $v_2 = 600 \text{ м/с}$ відповідають однакові значення функції роз-поділу Максвелла $f(v)$.

3.6 Знайти число молекул гелію, які знаходяться в об'ємі $V = 1 \text{ см}^3$ при температурі $t = 690^\circ \text{C}$, модуль швидкості яких лежить в інтервалі швидкостей від $v_1 = 2390 \text{ м/с}$ до $v_2 = 2410 \text{ м/с}$. Густина гелію $\rho = 2,16 \cdot 10^{-4} \text{ кг/м}^3$, молярна маса $M = 0,004 \text{ кг/моль}$.

3.7 Яка температура відповідає середній квадратичній швидкості молекул вуглекислого газу $v_{\text{кв}} = 720 \text{ км/год}$? Молярна маса вуглекислого газу $M = 0,044 \text{ кг/моль}$.

3.8 Густина деякого газу $\rho = 6 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$, середня квадратична швидкість його молекул $v_{\text{кв}} = 500 \text{ м/с}$. Знайти тиск p , який газ чинить на стінки балона.

3.9 Знайти найбільш імовірну $v_{\text{імов}}$ та середню арифметичну $v_{\text{сер}}$ швидкості молекул хлору при температурі $t = 227^\circ \text{C}$. Молярна маса хлору $M = 0,07 \text{ кг/моль}$.

3.10 Знайти середній час $\bar{\tau}$ вільного пробігу молекул кисню при тиску $p = 2$ мм рт. ст. і температурі $t = 27^\circ\text{C}$. Ефективний діаметр молекул кисню $d = 3 \times 10^{-10}$ м, молярна маса кисню $M = 0,032$ кг / моль .

3.11 Знайти середнє число зіткнень \bar{z} молекул, які відбудуться за час $t = 1$ с в об'ємі $V = 1$ см³ азоту за нормальних умов. Ефективний діаметр молекул азоту $d = 3,1 \cdot 10^{-10}$ м , молярна маса азоту $M = 0,028$ кг / моль .

3.12 Скільки зіткнень \bar{z} за час $t = 1$ с зазнає молекула неону при температурі $T = 600$ К і тиску $p = 1$ мм рт. ст.? Ефективний діаметр молекули неону $d = 2,04 \cdot 10^{-10}$ м , молярна маса неону $M = 0,02$ кг / моль .

3.13 Розрахувати середню довжину вільного пробігу $\bar{\lambda}$ та час $\bar{\tau}$ між двома зіткненнями молекул кисню при тиску $p = 0,2$ мПа і температурі $t = 17^\circ\text{C}$. Ефективний діаметр молекул кисню $d = 3 \cdot 10^{-10}$ м .

3.14 Для водню при атмосферному тиску $p = 760$ мм рт. ст. і температурі $t = 20^\circ\text{C}$ довжина вільного пробігу $\bar{\lambda} = 1,28 \cdot 10^{-7}$ м . Знайти ефективний діаметр молекул водню d .

3.15 Для азоту при температурі $t = 27^\circ\text{C}$ і тиску $p = 10^5$ Па коефіцієнт внутрішнього тертя $\eta = 1,79 \cdot 10^{-6}$ П·с·м⁻¹. Знайти значення середньої довжини вільного пробігу $\bar{\lambda}$ молекул азоту за цих умов.

3.16 Балон об'ємом $V = 5$ л вміщує $N = 10^{23}$ молекул одноатомного газу. Коефіцієнт теплопровідності цього газу $\chi = 8,4 \cdot 10^{-3}$ Вт / (м · К). Знайти за цих умов коефіцієнт дифузії газу D .

3.17 Розрахувати коефіцієнт теплопровідності водню χ , в'язкість якого $\eta = 8,6 \cdot 10^{-6}$ П·с·м⁻¹. Молярна маса водню $M = 0,002$ кг / моль .

3.18 У скільки разів зміниться коефіцієнт в'язкості повітря η при зниженні температури від $t_1 = 20^\circ\text{C}$ до $t_2 = -40^\circ\text{C}$, що спостерігається при підніманні літака на велику висоту?

3.19 На якій висоті h густина кисню ρ зменшується на 1%? Температура кисню $t = 27^\circ\text{C}$.

3.20 На якій висоті тиск повітря p вдвічі менший, ніж тиск p_0 на рівні моря? Температура повітря T приблизно стала і дорівнює 273 К.

3.21 Якою була б товщина h атмосфери Землі, якби густина повітря не змінювалась з висотою і дорівнювала $\rho = 1,25 \text{ кг/м}^3$?

3.2 Перший початок термодинаміки

- Внутрішня енергія ідеального газу:

$$U = \frac{m}{M} \frac{i}{2} RT, \quad (3.13)$$

де i - число ступенів вільності молекули.

- Перший початок термодинаміки (диференціальна форма):

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (3.14)$$

де δQ – елементарна кількість теплоти, наданої термодинамічній системі; dU – нескінченно мала зміна внутрішньої енергії системи; $\delta A = pdV$ – елементарна робота, яка виконується системою над зовнішніми тілами.

- Теплоємність одного моля ідеального газу при сталому об'ємі:

$$C_V = \frac{i}{2} R. \quad (3.15)$$

- Теплоємність одного моля ідеального газу при сталому тиску:

$$C_P = \frac{i+2}{2} R. \quad (3.16)$$

- Рівняння Майєра:

$$C_p = C_v + R \quad (3.17)$$

- Рівняння ізотермічного процесу:

$$pV = const \quad (3.18)$$

- Рівняння адіабатного процесу:

$$pV^\gamma = const, \quad TV^{\gamma-1} = const, \quad Tp^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = const, \quad (3.19)$$

де $\gamma = C_p / C_v$.

- Робота газу в ізобарному процесі:

$$A = p(V_2 - V_1). \quad (3.20)$$

- Робота газу в ізотермічному процесі:

$$A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{M} RT \ln \frac{p_1}{p_2}. \quad (3.21)$$

- Робота газу в адіабатному процесі:

$$A = \frac{RT_1}{\gamma - 1} \cdot \frac{m}{M} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right]. \quad (3.22)$$

3.22 Визначити внутрішню енергію U кисню масою $m = 10$ г при температурі $t = 20^\circ\text{C}$. Молярна маса кисню $M = 0,032$ кг / моль .

3.23 Знайти внутрішню енергію U двоатомного газу, який знаходиться в балоні об'ємом $V = 5$ л при тиску $p = 50$ кПа.

3.24 Двохатомний газ, маса якого $m = 2$ кг та густина $\rho = 5$ кг / м³, знаходиться при тиску $p = 60$ кПа. Знайти енергію теплового руху U молекул газу.

3.25 В посудині об'ємом $V = 10$ л знаходиться $N = 10^{23}$ молекул кисню, середня швидкість яких $v_{\text{ср}} = 600$ м/с. Знайти тиск p і енергію обертального руху молекул газу $W_{\text{об}}$.

3.26 Кисень нагрівається при сталому тиску $p = 50$ кПа. Його об'єм зростає від $V_1 = 2$ м³ до $V_2 = 4$ м³. Визначити зміну ΔU внутрішньої енергії кисню, роботу A , виконану ним при розширенні, і кількість теплоти Q , наданої газу.

3.27 Кисень масою $m = 10$ г знаходиться в балоні при тиску $p_1 = 3$ ат та температурі $T_1 = 300$ К. Після нагрівання при сталому тиску газ займає об'єм $V_2 = 10$ л. Знайти кількість теплоти Q , наданої газу.

3.28 У вертикальному циліндрі під поршнем, площа поперечного перерізу якого $S = 10$ см², знаходиться стовпчик повітря заввишки $h = 50$ см при температурі $t = 20$ °С. Поршень може переміщуватися без тертя, його маса $m = 10$ кг. Газ нагріли на $\Delta t = 50$ °С. Визначити роботу A , виконану газом.

3.29 Знайти молярну масу газу M знаючи, що при ізобарному нагріванні цього газу масою $m = 1$ кг на $\Delta T = 10$ К необхідно надати газу на $Q = 2,96$ кДж теплоти більше, ніж при ізохорному нагріванні газу до тієї ж температури.

3.30 Два кіломоля вуглекислого газу нагріваються при сталому тиску на $\Delta T = 50$ К. Знайти зміну внутрішньої енергії газу ΔU , роботу розширення A і кількість теплоти Q , надану газу. Молярна маса вуглекислого газу $M = 0,044$ кг / моль.

3.31 Газ, що займав об'єм $V_1 = 5$ л і знаходився при тиску $p_1 = 2 \cdot 10^5$ Па та температурі $t_1 = 17$ °С, був нагрітий ізобарно. Робота розширення газу при цьому дорівнювала $A = 200$ Дж. На скільки кельвін змінилася температура газу?

3.32 При ізотермічному розширенні азоту масою $m = 100$ г, що знаходиться при температурі $t = 27$ °С, була здійснена робота $A = 600$ Дж. У скільки разів змінився тиск азоту при розширенні?

3.33 Яка кількість теплоти Q виділиться, якщо азот масою $m = 2$ г, узятий при температурі $T_1 = 280$ К і тиску $p_1 = 10^5$ Па,

ізотермічно стискувати до тиску $p_2 = 10^6$ Па? Молярна маса азоту $M = 0,028$ кг / моль.

3.34 Азот масою $m = 10,5$ г ізотермічно розширюється при температурі $T = 250$ К від тиску $p_1 = 2,5$ ат до $p_2 = 1$ ат. Знайти роботу A , виконану газом при розширенні.

3.35 До якої температури T_2 охолонуть повітря, що знаходилося при температурі $T_1 = 273$ К, якщо воно розширюється адіабатично від об'єму V_1 до об'єму $V_2 = 2V_1$?

3.36 При адіабатному стисненні повітря в циліндрах двигуна внутрішнього згорання тиск змінюється від $p_1 = 0,1$ МПа до $p_2 = 3,5$ МПа. Початкова температура повітря $t_1 = 40^\circ\text{C}$. Знайти температуру t_2 повітря наприкінці стискування.

3.37 Два гази, один з яких одноатомний, а другий двоатомний, знаходяться при однакових температурах і займають однакові об'єми. Гази стискуються адіабатно так, що об'єм кожного з них зменшується удвічі. Який з газів нагріється більше і у скільки разів?

3.38 Кисень, що займав об'єм $V_1 = 8$ л, адіабатно стиснули до об'єму $V_2 = 1$ л, причому наприкінці стискування тиск дорівнював $p_2 = 1,5$ МПа. Під яким тиском знаходився газ до стискування?

3.39 Повітря, яке знаходилося при тиску $p_1 = 200$ кПа, було адіабатно стиснуте до тиску $p_2 = 500$ кПа. Визначити тиск p_3 , який встановиться, коли повітря охолонуть до початкової температури при сталому об'ємі.

3.40 Двоатомний газ, що займає об'єм $V_1 = 10$ л при тиску $p_1 = 2$ ат, адіабатно розширюється до об'єму $V_2 = 2V_1$. У скільки разів зміниться температура газу при цьому і яку роботу A він виконає?

3.41 Деяка кількість водню за нормальних умов займає об'єм $V_1 = 100$ см³. Як зміниться внутрішня енергія газу U при його адіабатичному розширенні до об'єму $V_2 = 150$ см³?

3.42 Азот масою $m = 2$ г при температурі $T_1 = 300$ К адіабатно стискують так, що його об'єм зменшується в $n = 10$ разів. Визначити кінцеву температуру газу T_2 і роботу стискування A .

3.43 В балоні місткістю $V = 10$ л знаходиться повітря при тиску $p_1 = 10^5$ Па. Яку кількість теплоти Q треба надати повітрю, щоб його тиск підвищився в $n = 5$ разів?

3.44 В балоні місткістю $V = 10$ л знаходиться водень при високому тиску. Внаслідок несправності вентиля газ поступово витікає з балона. При температурі $t_1 = 7^\circ\text{C}$ манометр показував тиск $p_1 = 4,9 \cdot 10^6$ Па. Через деякий час при температурі $t_2 = 17^\circ\text{C}$ манометр показав такий же тиск. Знайти масу газу Δm , який витік з балона за цей час?

3.3 Другий початок термодинаміки

- Коефіцієнт корисної дії теплової машини:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}, \quad (3.23)$$

де Q_1 – кількість теплоти, отримана робочим тілом від нагрівача;
 Q_2 – кількість теплоти, віддана робочим тілом холодильнику.

- Коефіцієнт корисної дії ідеальної теплової машини:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (3.24)$$

де T_1 – температура нагрівача, T_2 – температура холодильника.

- Зміна ентропії речовини масою m і питомою теплоємністю c при нагріванні від температури T_1 до температури T_2 :

$$\Delta S = cm \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (3.25)$$

- Зміна ентропії при зміні агрегатного стану речовини:

$$\Delta S = \frac{\lambda m}{T}, \quad \Delta S = \frac{r m}{T}, \quad (3.26)$$

де λ і r – питомі теплоти плавлення і пароутворення відповідно.

- Зміна ентропії ідеальних газів унаслідок ізохорного та ізобарного процесів:

$$\Delta S = m \left(c_v \ln \frac{p_2}{p_1} + c_p \ln \frac{V_2}{V_1} \right), \quad (3.27)$$

де $c_v = \frac{C_v}{M}$ – питома теплоємність газу при $V = const$, $c_p = \frac{C_p}{M}$ – питома теплоємність газу при $p = const$.

3.45 Ідеальна теплова машина, що працює за циклом Карно, здійснює за один цикл роботу $A = 7,35 \cdot 10^4 \text{ Дж}$. Температура нагрівача $t_1 = 100^\circ \text{C}$, холодильника $t_2 = 0^\circ \text{C}$. Знайти ККД машини; кількість теплоти Q_1 , що отримується робочим тілом за один цикл від нагрівача; кількість теплоти Q_2 , що віддається за один цикл холодильнику.

3.46 Ідеальна теплова машина, що працює за циклом Карно, 80% теплоти, отриманої від нагрівача, передає холодильнику. Кількість теплоти, що отримується робочим тілом за один цикл від нагрівача $Q_1 = 6,3 \text{ Дж}$. Знайти ККД циклу η і роботу A , виконану за один цикл.

3.47 Ідеальна теплова машина, що працює за циклом Карно, за цикл отримує від нагрівача кількість теплоти $Q_1 = 5,6 \text{ кДж}$. Температура нагрівача $T_1 = 460 \text{ К}$, температура холодильника $T_2 = 300 \text{ К}$. Визначити роботу A , виконану машиною за один цикл, і кількість теплоти Q_2 , що віддається холодильнику за один цикл.

3.48 Теплова машина, що працює за циклом Карно, за один цикл здійснює роботу $A = 2,94 \text{ кДж}$ і віддає холодильнику кількість теплоти $Q_2 = 13,4 \text{ кДж}$. Знайти ККД циклу η .

3.49 Парова машина потужністю $P = 14,7 \text{ кВт}$ за час роботи $t = 1$ год споживає вугілля масою $m = 8,1 \text{ кг}$, його питома теплота

згорання $q = 29$ МДж/кг . Температура в паровому казані (нагрівачі) $t_1 = 200^\circ\text{C}$, температура навколишнього повітря (холодильника) $t_2 = 18^\circ\text{C}$. Знайти ККД парової машини і порівняти його з ККД ідеальної теплової машини, що працює по циклу Карно з тими ж температурами нагрівача і холодильника.

3.50 Вуглекислий газ масою $m = 200$ г ізобарно нагрівають від $T_1 = 300$ К до $T_2 = 600$ К. Знайти приріст ентропії газу ΔS . Молярна маса вуглекислого газу $M = 0,044$ кг / моль .

3.51 Кисень масою $m = 10$ г нагрівається від температури $t_1 = 50^\circ\text{C}$ до температури $t_2 = 150^\circ\text{C}$. Знайти приріст ентропії ΔS , якщо нагрівання відбувається при сталому об'ємі. Молярна маса кисню $M = 0,032$ кг / моль .

3.52 Газ з N молекул, що займав об'єм V_1 , розширюється ізотермічно до об'єму V_2 . Знайти зміну ентропії газу ΔS при цьому процесі.

3.53 Водень, маса якого $m = 6,6$ г, розширюється ізобарно до подвоєння об'єму. Знайти приріст ентропії газу ΔS .

3.54 Знайти приріст ентропії ΔS при ізотермічному розширенні водню, якщо його тиск змінюється від $p_1 = 10^5$ Па до $p_2 = 0,5 \cdot 10^5$ Па .

3.55 Знайти зміну ентропії ΔS при перетворенні $m = 10$ г льоду температурою $t_1 = -20^\circ\text{C}$ в пару температурою $t_3 = 100^\circ\text{C}$. Питома теплота плавлення льоду $\lambda = 3,35 \cdot 10^5$ Дж / кг, питома теплота випаровування води $r = 22,6 \cdot 10^5$ Дж / кг, питома теплоємність льоду $c_{\text{л}} = 2100$ Дж / (кг · К), во-ди — $c_{\text{в}} = 4200$ Дж / (кг · К) .

3.56 Один моль повітря від тиску $p_1 = 10^5$ Па і температури $T_1 = 300$ К адіабатно стискується так, що його тиск стає $p_2 = 2 \cdot 10^5$ Па . Знайти об'єм V_2 і температуру T_2 повітря в другому стані. Чому дорівнює зміна ентропії газу ΔS ?

3.57 Знайти зміну ентропії ΔS під час переходу повітря масою $m = 2$ г з першого стану з об'ємом $V_1 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ і тиском $p_1 = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}$ в другий стан з об'ємом $V_2 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ і тиском $p_2 = 10^5 \text{ Па}$. Молярна маса повітря $M = 0,029$ кг / моль.

4 Електростатика

4.1 Закон Кулона. Напруженість і потенціал електричного поля

- Сила взаємодії двох точкових зарядів q_1 і q_2 (закон Кулона):

$$F = k_0 \frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2}, \quad (4.1)$$

де $k_0 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$ ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – електрична стала),

r – відстань між зарядами, ε – діелектрична проникність середовища.

- Напруженість електричного поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \quad (4.2)$$

де q – пробний заряд.

- Напруженість поля площини, рівномірно зарядженої з поверхневою густиною $\sigma = q/S$:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0\varepsilon}. \quad (4.3)$$

- Напруженість поля між двома рівномірно і різнойменно зарядженими площинами:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0\varepsilon}. \quad (4.4)$$

- Напруженість поля точкового заряду і поля навколо рівномірно зарядженої кулі:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{q}{r^2}. \quad (4.5)$$

- Напруженість поля зарядженої прямої нитки і поля навколо рівномірно зарядженого циліндра на відстані r від його осі:

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon r}, \quad (4.6)$$

де τ – заряд, що припадає на одиницю довжини нитки або циліндра.

- Робота, виконана при переносі заряду q в електричному полі з точки 1 у точку 2:

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU, \quad (4.7)$$

де $\varphi_1 - \varphi_2$ – різниця потенціалів, U – напруга між точками 1 і 2.

- Зв'язок напруженості поля з потенціалом:

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi, \quad U = -\int_1^2 E_s ds. \quad (4.8)$$

- Потенціал поля точкового заряду і поля навколо рівномірно зарядженої кулі:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}. \quad (4.9)$$

- Напруга між обкладинками плоского конденсатора:

$$U = E \cdot d, \quad (4.10)$$

де d – відстань між обкладинками.

- Напруга між обкладинками циліндричного конденсатора:

$$U = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon} \ln \frac{R_2}{R_1}, \quad (4.11)$$

де R_1 й R_2 – радіуси циліндрів.

- Напруга між обкладинками сферичного конденсатора:

$$U = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right), \quad (4.12)$$

де R_1 і R_2 – радіуси внутрішньої і зовнішньої сфер.

4.1 Точкові заряди $q_1 = 10^{-9}$ Кл і $q_2 = 2 \cdot 10^{-9}$ Кл розташовані на відстані $r = 3$ см один від одного. Знайти точку, в якій сила, що діє на пробний заряд q' , дорівнює нулю.

4.2 Однакові точкові заряди величиною $q = 10^{-9}$ Кл розташовані у вершинах прямокутного трикутника, катети якого $a = 3$ см і $b = 4$ см. Знайти силу, що діє на заряд, який знаходиться у вершині прямого кута.

4.3 У вершинах квадрата зі стороною $a = 10$ см розташовані однакові заряди $q = 10^{-8}$ Кл. Знайти напруженість поля в центрі квадрата для таких комбінацій знаків цих зарядів: 1) + + + +, 2) + + - -, 3) +- + -.

4.4 В атомі водню електрон обертається навколо протона по коловій орбіті. Радіус орбіти $r = 0,53 \cdot 10^{-10}$ м, заряди електрона і протона однакові за модулем і дорівнюють $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, маса електрона $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг. Знайти відношення швидкості світла до швидкості електрона. Скільки обертів за секунду робить електрон?

4.5 Вважаючи протон і електрон, з яких складається атом водню, за точкові заряди, що перебувають на відстані $r = 0,53 \cdot 10^{-10}$ м один від одного, знайти напруженість поля в точках B і C , що знаходяться на такій же відстані від протона, як і електрон (рисунок 4.1). Заряд електрона і протона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

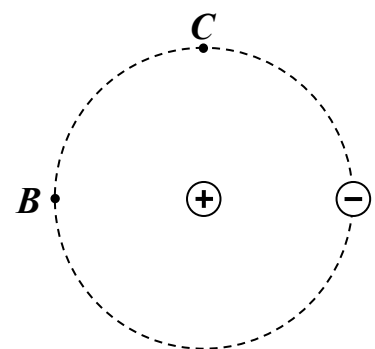


Рисунок 4.1

4.6 Дві маленькі провідні кульки підвішені на довгих непровідних нитках до одного гачка. Кульки однакові за розміром, заряджені однаковими зарядами і перебувають на відстані $r = 5$ см одна від одной. Що відбудеться, якщо одну із кульок розрядити?

4.7 Кулька масою $m = 0,1$ г, що має заряд $q = 2 \cdot 10^{-9}$ Кл, підвішена до вертикальної зарядженої площини на нитці, яка утворює із площиною кут $\alpha = 30^\circ$. Знайти поверхневу густину заряду σ на площині.

4.8 У сферичному повітряному конденсаторі радіус внутрішньої сфери $R_1 = 2$ см, зовнішньої $R_2 = 4$ см, а напруга між ними $U = 3$ кВ. Знайти напруженість електричного поля на відстані $r = 3$ см від центра сфер.

4.9 Скільки електронів складають заряд q порошинки, якщо вона утримується в рівновазі в плоскому конденсаторі з горизонтальними обкладками, відстань між якими $d = 5$ мм, а напруга $U = 75$ В? Маса порошинки $m = 10^{-9}$ г, заряд електрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

4.10 На відстані $r = 4$ мм від прямого проводу довжиною $l = 150$ см, на якому рівномірно розподілений заряд $q_1 = 2 \cdot 10^{-7}$ Кл, перебуває порошинка із зарядом $q_2 = 1,6 \cdot 10^{-16}$ Кл. Визначити силу F , що діє на порошинку.

4.11 Два протони перебувають на відстані $r = 1,5 \cdot 10^{-15}$ м один від одного. Знайти: 1) силу F взаємодії протонів; 2) роботу A , виконану при їхньому зближенні від ∞ до відстані r . Заряд протона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

4.12 Відстань між паралельними зарядженими пластинами $d = 2$ см, розмір пластин набагато більше d , так що напруженість поля між ними стала і дорівнює $E = 2 \cdot 10^4$ В/м. Яка різниця потенціалів U між цими пластинами?

4.13 Знайти швидкість електрона, прискореного напругою $U = 1; 10; 1000$ В.

4.14 Відстань між обкладинками плоского конденсатора $d = 2$ см, що набагато менше їх лінійних розмірів. Напруга між обкладинками $U = 120$ В. Знайти швидкість електрона, що пройшов без початкової швидкості шлях $s = 1$ см від обкладинки

зарядженої негативно до позитивної. Заряд електрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, маса $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

4.15 Дві маленькі кульки із зарядами $q_1 = 5 \cdot 10^{-9}$ Кл і $q_2 = 2 \cdot 10^{-9}$ Кл перебувають на відстані $r_1 = 40$ см одна від одної. Яку роботу треба виконати, щоб зблизити їх до відстані $r_2 = 20$ см?

4.16 Електрон в атомі водню перебуває від ядра атома (протона) на відстані $r = 5,3 \cdot 10^{-11}$ м. Яка повинна бути швидкість v електрона, щоб він зміг вийти з атома на нескінченність?

4.17 N заряджених водяних крапель радіусом r , що мають заряд q кожна, зливаються в одну більшу краплю. Знайти потенціал φ цієї краплі.

4.18 Кулька радіусом $R = 4$ заряджена до потенціалу $\varphi = -2000$ В. Знайти масу всіх електронів, що складають заряд кульки, якщо заряд одного електрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, а його маса $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

4.19 Знайти розмір сфери, здатної утримувати в повітрі потенціал $\varphi = 500$ кВ. Чому дорівнює електричний заряд цієї сфери? Електрична міцність повітря (напруженість поля пробую) $E_{max} = 30$ кВ/см.

4.20 Яку роботу потрібно виконати, щоб перемістити заряд $q_1 = 5 \cdot 10^{-9}$ Кл з нескінченності в точку, що перебуває на відстані $r = 5$ см від центра кулі радіусом $R = 2$ см, зарядженої з поверхневою густиною заряду $\sigma = 2 \cdot 10^{-9}$ Кл/см²?

4.21 Металева кулька радіусом $R = 2$ см заряджена до потенціалу $\varphi_R = 10$ В. Знайти роботу, яку необхідно виконати, щоб помістити в точку, що перебуває на відстані $r_1 = 3$ см від центра кулі, точковий заряд $q_1 = 2 \cdot 10^{-8}$ Кл.

4.22 На яку відстань можуть зблизитися два електрони, якщо вони рухаються назустріч один одному з відносною швидкістю $v = 10^6$ м/с?

4.2 Електроємність. Енергія електричного поля

- Електрична ємність відокремленого провідника:

$$C = \frac{q}{\varphi}. \quad (4.13)$$

- Ємність відокремленої кулі радіусом R :

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R. \quad (4.14)$$

- Заряд конденсатора ємністю C при напрузі U :

$$q = CU. \quad (4.15)$$

- Ємність плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon_0\varepsilon S}{d}, \quad (4.16)$$

де S – площа кожної з обкладинок конденсатора, d – відстань між ними.

- Ємність циліндричного конденсатора:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon l}{\ln \frac{R_2}{R_1}}, \quad (4.17)$$

де l – довжина циліндрів, R_1 і R_2 – їх радіуси.

- Ємність сферичного конденсатора:

$$C = \frac{4\pi\varepsilon_0\varepsilon R_1R_2}{R_2 - R_1}, \quad (4.18)$$

де R_1 і R_2 – радіуси сфер.

- Загальна ємність C паралельно з'єднаних конденсаторів:

$$C = \sum_{i=1}^N C_i. \quad (4.19)$$

- Загальна ємність C послідовно з'єднаних конденсаторів:

$$C = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i}}. \quad (4.20)$$

- Енергія зарядженого конденсатора:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}. \quad (4.21)$$

- Об'ємна густина енергії електричного поля:

$$w = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} = \frac{\vec{D}\vec{E}}{2}, \quad (4.22)$$

де $\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}$ – вектор електричної індукції поля.

4.23 Конденсатори ємністю $C_1 = 2$ мкФ і $C_2 = 4$ мкФ з'єднані послідовно в батарею, до якої прикладена різниця потенціалів $U = 60$ В. Знайти заряд і різницю потенціалів на обкладках кожного з конденсаторів.

4.24 Знайти радіус кулі, електрична ємність якої $C = 1$ Ф.

4.25 Знайти ємність C сферичного конденсатора, що складається із двох концентричних сфер радіусами $R_1 = 10$ см і $R_2 = 10,5$ см. Простір між сферами заповнено мастилом з діелектричною проникністю $\varepsilon = 2$. Який радіус повинна мати відокремлена куля, поміщена у це мастило, щоб її ємність була такою ж?

4.26 Коаксіальний електричний кабель складається із центральної жили радіусом $R_1 = 1,3$ см і концентричної стосовно неї циліндричної оболонки радіусом $R_2 = 3$ см, між якими знаходиться ізолятор з діелектричною проникністю $\varepsilon = 3,2$.

Знайти ємність такого кабеля одиничної довжини (в мікрофарадах на метр).

4.27 Відстань між обкладинками плоского повітряного конденсатора $d = 0,1$ мм. Ємність конденсатора $C = 1$ мкФ. Яка площа S кожної з його обкладинок?

4.28 Напруга між обкладинками плоского повітряного конденсатора $U = 90$ В. Площа кожної обкладинки $S = 60$ см², заряд $q = 10^{-9}$ Кл. Яка відстань d між обкладинками?

4.29 Плоский повітряний конденсатор із площею кожної з обкладинок $S = 100$ см² і відстанню між ними $d_1 = 1$ мм підключений до джерела напругою $U = 100$ В. Не відключаючи джерела, обкладинки його розсовують до відстані $d_2 = 5$ мм. Знайти енергію, запасену конденсатором у початковому та кінцевому положеннях.

4.30 Плоский повітряний конденсатор з обкладинками площею $S = 50$ см² кожна, відстань між якими $d_1 = 2$ мм, заряджається до напруги $U = 200$ В і відключається від джерела. Після цього його обкладинки розсовують до відстані $d_2 = 5$ мм. Знайти енергію конденсатора в першому й другому положеннях.

4.31 Конденсатор, заряджений до напруги $U_1 = 100$ В, з'єднується з конденсатором тієї ж ємності, але зарядженим до напруги $U_2 = 200$ В: одного разу однойменно, іншого разу – різнойменно зарядженими обкладинками. Яка напруга встановиться між обкладинками в обох випадках?

4.32 Заряджена куля радіусом $R_1 = 2$ см приводиться в зіткнення з незарядженою кулею радіусом $R_2 = 5$ см. Після того, як кулі роз'єднали, заряд другої кулі виявився рівним $q_2' = 5 \cdot 10^{-8}$ Кл. Знайти заряд q_1 , який мала перша куля до зіткнення із другою. Знайти поверхневу густину заряду куль σ_1' і σ_2' після їхнього зіткнення.

4.33 Куля радіусом $R_1 = 1$ м, що має заряд $q_1 = 10^{-5}$ Кл, з'єднується провідником із Землею. Показати, що заряд кулі “підє в землю”. Радіус земної кулі $R_2 = 6400$ км.

4.34 Конденсатор ємністю $C_1 = 1000$ пФ, заряджений до напруги $U = 100$ В, з'єднують із незарядженим конденсатором ємністю $C_2 = 2000$ пФ. Яка енергія ΔW витрачається на утворення іскри, що виникає в момент з'єднання конденсаторів?

4.35 Знайти об'ємну густину енергії електричного поля в точці, що перебуває на відстані $r = 2$ см від нескінченно довгої нитки, зарядженої з лінійною густиною заряду $\tau = 1,67 \cdot 10^{-7}$ Кл/м.

4.3 Електричне поле в діелектриках

- Вектор електричної індукції (електричного зміщення) поля:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}. \quad (4.23)$$

- У діелектрику:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}, \quad (4.24)$$

де $\vec{P} = \varepsilon_0 (\varepsilon - 1) \vec{E}$ – вектор поляризованості (електричний дипольний момент одиниці об'єму діелектрика).

- Зв'язок між поверхневою густиною σ' зв'язаних зарядів на межі розділу діелектрик–провідник із поверхневою густиною σ вільних зарядів на провіднику:

$$\sigma' = P_n = - \sigma \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}, \quad (4.25)$$

де P_n – нормальна до поверхні складова вектора поляризації.

4.36 На провідній кулі діаметром $d = 6$ см знаходиться заряд $q = 2 \cdot 10^{-8}$ Кл. Куля занурена в гас ($\varepsilon = 2$) і розташована на значній відстані від стінок посудини. Визначити густину енергії електричного поля w в точках, що віддалені від центра кулі на $r_1 = 2$ см і $r_2 = 4$ см.

4.37 Два однакових повітряних конденсатори ємністю $C = 0,01$ мкФ з'єднані послідовно і підключені до джерела з напругою $U = 10$ В. Знайти заряд q , який протече по електричному колу, якщо в простір між обкладками одного із конденсаторів увести діелектрик проникністю $\varepsilon = 5$.

4.38 Відстань між обкладками плоского повітряного конденсатора $d = 5$ мм набагато менша його розмірів. До однієї з обкладинок щільно прилягає скляна пластинка товщиною $d_1 = 3$ мм, що має діелектричну проникність $\varepsilon = 6$. Знайти напруженість електричного поля в пластинці і в повітрі між обкладинками, якщо напруга конденсатора $U = 100$ В.

4.39 Два заряди у вакуумі взаємодіють із такою ж силою на відстані $r_0 = 11$ см, як у скипидарі на відстані $r = 7,4$ см. Визначити діелектричну проникність ε скипидару.

4.40 Визначити густину зв'язаних зарядів на поверхнях слюдяної пластинки товщиною $d = 0,2$ мм, що служить ізолятором у плоскому конденсаторі, зарядженому до напруги $U = 400$ В. Діелектрична проникність слюди $\varepsilon = 6$.

4.41 Простір між обкладинками плоского конденсатора заповнено склом. Відстань між обкладинками $d = 4$ мм. На обкладинки подано напругу $U = 1200$ В. Знайти: 1) напруженість поля в склі; 2) поверхневу густину заряду на обкладинках конденсатора; 3) поверхневу густину зв'язаного заряду на склі. Діелектрична проникність скла $\varepsilon = 6$.

4.42 Обкладинки плоского конденсатора площею $S = 2 \cdot 10^{-2}$ м² кожна перебувають у гасі на відстані $d = 4$ мм одна від одної. Знайти силу F , з якою вони притягаються одна до одної, якщо напруга між ними $U = 150$ В. Діелектрична проникність гасу $\varepsilon = 2$.

4.43 Дуже маленьку заряджену кульку занурили в гас. На якій відстані від кульки напруженість поля буде такою ж, яка була до занурення на відстані $r_1 = 29$ см? Діелектрична проникність гасу $\varepsilon = 2$.

4.44 Позитивно заряджена кулька масою $m=0,18$ г і густиною речовини $\rho_k=1800$ кг/м³ перебуває в рівновазі в рідкому діелектрику густиною $\rho_p=900$ кг/м³. В діелектрику створене однорідне електричне поле, напруженість якого направлена вертикально вгору і дорівнює за модулем $E=45$ кВ/м. Знайти заряд кульки.

5 Постійний електричний струм

- Сила струму чисельно дорівнює заряду, що проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу:

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (5.1)$$

- Сила постійного струму:

$$I = \frac{q}{t}. \quad (5.2)$$

- Густина електричного струму:

$$j = \frac{I}{S} = ne\bar{v}, \quad (5.3)$$

де S – площа поперечного перерізу провідника, $n=N/V$ – число електронів провідності в одиниці об'єму, e – заряд електрона, \bar{v} – середня швидкість упорядкованого руху електронів (*дрейфова швидкість*).

- Закон Ома для ділянки електричного кола:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (5.4)$$

де R – опір ділянки, U – напруга на ділянці.

- Опір проводу довжиною l із сталим перерізом S :

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (5.5)$$

де ρ – питомий опір проводу.

- Закон Ома в диференційній формі:

$$j = \sigma \cdot E, \quad (5.6)$$

де $\sigma = 1/\rho$ – питома провідність, E – напруженість електричного поля в даній точці усередині провідника.

- Закон Джоуля-Ленца:

$$\delta Q = I^2 R dt, \quad (5.7)$$

де δQ – кількість теплоти, виділеної в провіднику опором R за час dt .

- Закон Джоуля-Ленца в диференційній формі:

$$w = \sigma \cdot E^2 = \rho \cdot j^2, \quad (5.8)$$

де w – кількість теплоти, виділеної в одиниці об'єму за одну секунду.

- Закон Ома для повного електричного кола:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}, \quad (5.9)$$

де ε й r – ЕРС і внутрішній опір джерела струму, R – опір навантаження.

- Потужність струму на ділянці електричного кола з опором R :

$$P = IU = I^2 R. \quad (5.10)$$

- Коефіцієнт корисної дії джерела струму:

$$\eta = \frac{U}{\varepsilon} = \frac{R}{R + r}, \quad (5.11)$$

де U – спад напруги на зовнішній ділянці електричного кола.

5.1 Джерело постійного струму, яке має ЕРС $\varepsilon = 12$ В і внутрішній опір $r = 1$ Ом, замикають на резистор $R = 9$ Ом. Визначити силу струму I в колі, спад напруги U_R на

зовнішній ділянці й спад напруги U_r на внутрішній ділянці електричного кола.

5.2 Електрорушійна сила елемента $\varepsilon = 6$ В. При зовнішньому опорі $R = 1,1$ Ом сила струму в колі $I = 3$ А. Знайти спадання напруги U_r усередині елемента і його внутрішній опір r .

5.3 У провіднику опором $R = 2$ Ом, підключеному до джерела струму з ЕРС $\varepsilon = 1,1$ В, іде струм $I = 0,5$ А. Яка сила струму I_{max} при короткому замиканні джерела?

5.4 До кола напругою $U = 120$ В приєднані два резистори R_1 й R_2 . При їхньому послідовному з'єднанні струм дорівнює $I_1 = 3$ А, а при паралельному – сумарний струм дорівнює $I_2 = 16$ А. Чому рівні опори резисторів?

5.5 При силі струму $I_1 = 3$ А в зовнішньому колі виділяється потужність $P_1 = 18$ Вт, а при силі струму $I_2 = 1$ А – потужність $P_2 = 10$ Вт. Знайти ЕРС і внутрішній опір джерела струму.

5.6 Джерело постійного струму має внутрішній опір r . Яким повинен бути опір навантаження R , щоб у ньому виділялася максимальна потужність?

5.7 Два джерела струму з ЕРС $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 12$ В мають внутрішні опори $r_1 = 0,1$ Ом й $r_2 = 1$ Ом відповідно. Яку максимальну потужність P_{max} може віддати в зовнішню частину електричного кола кожне із джерел?

5.8 Батарея складається з $n = 5$ послідовно з'єднаних елементів з ЕРС $\varepsilon = 1,4$ В і внутрішнім опором $r = 0,3$ Ом кожного. При якому струмі I корисна потужність батареї $P = 8$ Вт? Яка максимальна корисна потужність P_{max} батареї?

5.9 Електрорушійна сила батареї $\varepsilon = 10$ В, а сила струму при короткому замиканні $I_{max} = 5$ А. Яку найбільшу потужність P_{max} може віддати батарея в зовнішню частину електричного кола?

5.10 Елемент, ЕРС якого $\varepsilon = 6$ В, створює максимальну силу струму $I_{max} = 3$ А. Знайти найбільшу кількість теплоти Q_{max} , що може бути виділена в зовнішній ділянці кола за час $t = 1$ хв.

5.11 Внутрішній опір батареї з ЕРС $\varepsilon = 12$ В дорівнює $r = 0,05$ Ом. Між полюсами батареї помилково включили провідник опором $R = 0,1$ Ом. Який струм протече через батарею? Яка потужність виділиться в провіднику? Де виділиться більше тепла – у провіднику чи в лампі потужністю $P = 100$ Вт?

5.12 Є дві електричні лампочки потужностями $P_1 = 40$ Вт й $P_2 = 60$ Вт, розраховані на напругу $U = 220$ В. Яку потужність P буде споживати кожна з лампочок, якщо їх підключити в коло послідовно?

5.13 До джерела струму з ЕРС $\varepsilon = 12$ В і внутрішнім опором $r = 1$ Ом підключений нагрівальний прилад, що має опір $R = 10$ Ом. Знайти коефіцієнт корисної дії η джерела в даному електричному колі, силу струму I й спад напруги U на зовнішній ділянці кола.

5.14 Електрорушійна сила елемента $\varepsilon = 1,6$ В, його внутрішній опір $r = 0,5$ Ом. Чому дорівнює коефіцієнт корисної дії елемента η в колі, по якому протікає струм $I = 2,4$ А?

5.15 Який внутрішній опір r генератора, якщо потужність, виділена в зовнішній частині електричного кола, однакова при двох значеннях зовнішнього опору $R_1 = 0,2$ Ом і $R_2 = 5$ Ом? Знайти коефіцієнт корисної дії генератора η в кожному з цих випадків.

5.16 Елемент замикають спочатку на резистор опором $R_1 = 2$ Ом, а потім на резистор опором $R_2 = 0,5$ Ом. У кожному з цих випадків потужність, виділена в зовнішній частині електричного кола, однакова й дорівнює $P = 2,54$ Вт. Знайти ЕРС елемента ε і його внутрішній опір r .

5.17 Напруга між точками A і B дорівнює $U = 9$ В. Є два провідники, опори яких $R_1 = 3$ Ом і $R_2 = 5$ Ом. Визначити кількість теплоти Q , що виділяється в кожному з провідників за час $t = 1$ с, якщо провідники між точками A і B включені: 1) послідовно; 2) паралельно.

5.18 По провіднику опором $R = 3$ Ом тече рівномірно зростаючий струм. За час $\tau = 8$ с у провіднику виділяється кількість теплоти $Q = 200$ Дж. Знайти заряд q , що пройшов за цей час по провіднику, якщо в початковий момент струм у провіднику був відсутній.

5.19 Знайти заряд q , що пройшов по провіднику опором $R = 10$ Ом при рівномірному наростанні напруги на кінцях провідника від $U_1 = 2$ В до $U_2 = 4$ В протягом часу $\tau = 20$ с.

5.20 Який заряд q переноситься через поперечний переріз провідника в таких випадках: 1) сила струму рівномірно зростає від нуля до $I_1 = 3$ А протягом часу $t = 10$ с; 2) сила струму убиває від $I_2 = 18$ А до нуля, причому за кожні $\Delta t = 0,01$ с вона убиває вдвічі?

5.21 Сила струму в провіднику опором $R = 12$ Ом рівномірно убиває від $I_1 = 5$ А до нуля за проміжок часу $\tau = 10$ с. Яка кількість теплоти Q виділиться в провіднику за цей час?

5.22 Припустимо, що в атомі водню електрон рухається навколо протона по коловій орбіті радіусом $R = 5,3 \cdot 10^{-11}$ м. Чому дорівнює струм I , обумовлений рухом електрона навколо протона? Заряд електрона й протона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, маса електрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

5.23 У мідному провіднику перерізом $S = 2$ мм² швидкість дрейфу електронів провідності $\bar{v} = 0,1$ мм/с. Яка сила струму I в провіднику? Молярна маса міді $M = 0,064$ кг/моль, її густина $D = 8,9 \cdot 10^3$ кг/м³.

5.24 Яка дрейфова швидкість \bar{v} електронів усередині мідного провідника довжиною $l = 1$ м, до кінців якого прикладено напругу $U = 0,01$ В? Молярна маса міді $M = 64$ г/моль, її густина $D = 8,9 \cdot 10^3$ кг/м³, питомий опір $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

5.25 По мідному провіднику перерізом $S = 0,17$ мм² протікає струм $I = 0,15$ А. Визначити, яка сила діє на окремі вільні електрони з боку електричного поля. Питомий опір міді $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

5.26 Визначити питомий опір ρ провідника довжиною $l = 2$ м, якщо при напрузі $U = 2$ В, прикладеній до його кінців, густина струму в провіднику $j = 10^6$ А/м².

5.27 Яка потужність виділяється в одиниці об'єму провідника довжиною $l = 0,2$ м, якщо до його кінців прикладена напруга $U = 4$ В? Питомий опір провідника $\rho = 10^{-6}$ Ом·м.

5.28 Визначити густину струму j у залізному проводі довжиною $l = 10$ м, якщо він перебуває під напругою $U = 6$ В. Питомий опір заліза $\rho = 8,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

5.29 Знайти сумарний імпульс p електронів у прямому проводі довжиною $l = 100$ м, по якому протікає струм $I = 10$ А.

5.30 Струм іде від мідної трубки радіусом $r = 2$ мм до мідної трубки радіусом $R = 4$ см по плоскій алюмінієвій фользі товщиною $d = 0,1$ мм (рисунок 5.1). Яка кількість теплоти Q виділяється в алюмінієвій фользі за час $t = 0,5$ с, якщо сила струму $I = 5$ А? Питомий опір алюмінію $\rho = 2,5 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

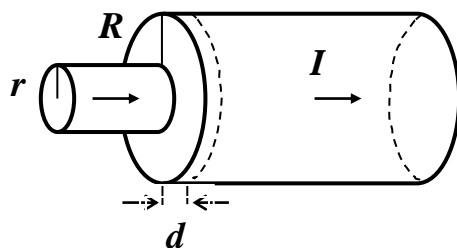


Рисунок 5.1

6 Електромагнетизм

6.1 Магнітне поле струмів

- Сила, що діє на елемент струму $I d\vec{l}$, в магнітному полі, індукція якого B (сила Ампера):

$$dF = Idl \cdot B \cdot \sin(\widehat{d\vec{l}, \vec{B}}). \quad (6.1)$$

- Сила, що діє на відрізок l одного з двох нескінченно довгих паралельних провідників, що знаходяться на відстані b , по яких течуть струми I_1 і I_2 :

$$F = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2 l}{2\pi b}. \quad (6.2)$$

- Зв'язок магнітної індукції B з напруженістю поля H :

$$B = \mu_0 \mu H, \quad (6.3)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала, μ – магнітна проникність речовини.

- Індукція магнітного поля прямолінійного провідника зі струмом I :

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{I}{R} (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2), \quad (6.4)$$

де R – відстань від провідника до точки спостереження; φ_1 і φ_2 – кути, під якими з цієї точки видно кінці провідника.

- Індукція магнітного поля нескінченного прямого провідника зі струмом I на відстані R від нього:

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2\pi R}. \quad (6.5)$$

- Магнітний момент p_m замкнутого плоского контура зі струмом I :

$$p_m = I \cdot S, \quad (6.6)$$

де S – площа контура.

- Індукція магнітного поля на осі колового струму:

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{2 p_m}{(R^2 + x^2)^{3/2}}, \quad (6.7)$$

де R – радіус колового струму, x – відстань від центра колового струму до точки спостереження.

- Індукція магнітного поля усередині довгої прямої котушки (соленоїда) в точках, близьких до її середини:

$$B = \mu_0 \mu \cdot n I, \quad (6.8)$$

де $n = N/l$ – число витків на одиницю довжини котушки.

- Індукція магнітного поля усередині тороїда (кільцевого соленоїда) на відстані r від його осі:

$$B = \frac{\mu_0 \mu \cdot N I}{2\pi r}. \quad (6.9)$$

- Циркуляція напруженості магнітного поля при обході навколо струмів I_1, I_2, \dots по контуру L :

$$\oint_L H_l dl = \sum_{\kappa=1}^N I_{\kappa}, \quad (6.10)$$

де H_l – проекція вектора \vec{H} на елемент контура $d\vec{l}$.

- Магнітний потік, що пронизує елементарну ділянку dS :

$$d\Phi = B dS \cdot \cos(\widehat{\vec{B}, \vec{n}}), \quad (6.11)$$

де \vec{n} – вектор нормалі до цієї ділянки.

- Робота, що виконується при переміщенні прямого провідника (або витка) зі струмом I в магнітному полі:

$$dA = I \cdot d\Phi, \quad (6.12)$$

де $d\Phi$ – магнітний потік крізь ділянку, що “замітається” провідником при його русі (зміна магнітного потоку, який пронизує площину витка при його переміщенні).

6.1 Визначити індукцію магнітного поля B , створеного відрізком провідника завдовжки $l = 60$ см, по якому протікає струм $I = 30$ А, в точці M , яка рівновіддалена від кінців провідника і знаходиться на відстані $R = 20$ см від його середини.

6.2 Визначити напруженість магнітного поля H , створеного струмом $I = 6$ А, що протікає по провіднику, зігнутому у вигляді прямокутника зі сторонами $a = 16$ см і $b = 30$ см в його центрі.

6.3 Струм силою $I = 30$ А йде по довгому провіднику, зігнутому під кутом $\alpha = 56^\circ$. Визначити напруженість магнітного поля в точці M , що знаходиться на бісектрисі кута на відстані $a = 5$ см від його вершини.

6.4 По провіднику, зігнутому у вигляді кільця радіусом $R = 11$ см, протікає струм $I = 14$ А. Знайти напруженість магнітного поля H , створеного цим струмом: а) в центрі кільця; б) в точці, що лежить на перпендикулярі до площини кільця, проведеному з його центра, на відстані $x = 10$ см від центра.

6.5 За теорією Бора електрон в атомі водню рухається навколо ядра (протона) по коловій орбіті радіусом $R = 5,3 \cdot 10^{-11}$ м. Знайти індукцію магнітного поля B , створеного електроном в центрі колової орбіти. Заряд електрона, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, його маса $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

6.6 Два колових контури струмом радіусом $R = 4$ см кожен розташовані в паралельних площинах на відстані $l = 10$ см один

від одного. В контурах протікають струми $I_1 = I_2 = 2$ А. Визначити напруженість магнітного поля H на осі контурів у точці, що знаходиться на однаковій відстані від них. Розглянути два випадки: 1) струми в контурах одного напрямку; 2) струми протилежних напрямків.

6.7 Нескінченно довгий провідник утворює колову петлю, дотичну до провідника. По провіднику йде струм $I = 5$ А. Знайти радіус петлі R , якщо відомо, що напруженість магнітного поля в центрі петлі $H = 41$ А/м.

6.8 Котушка завдовжки $l = 30$ см складається з $N = 1000$ витків дроту. Знайти напруженість магнітного поля H усередині котушки, якщо по котушці проходить струм $I = 2$ А. Діаметр котушки вважати малим у порівнянні з її довжиною.

6.9 Обмотка соленоїда виготовлена з дроту діаметром $d = 0,8$ мм. Витки щільно прилягають один до одного. Вважаючи котушку соленоїда достатньо довгою, знайти напруженість H магнітного поля всередині нього при силі струму $I = 1$ А.

6.10 Визначити індукцію B магнітного поля на осі тороїда квадратного перерізу без осердя, якщо по його обмотці, що містить $N = 200$ витків, протікає струм $I = 5$ А. Внутрішній діаметр тороїда $d_1 = 20$ см, зовнішній – $d_2 = 30$ см. Знайти магнітний потік Φ , що пронизує кожний з витків тороїда.

6.11 Струм іде по порожнистій металевій трубі. Показати, що: а) напруженість магнітного поля H усередині труби дорівнює нулю; б) напруженість магнітного поля H поза трубою така ж, як напруженість поля, створеного струмом, що протікає по тонкому дроту, розташованому по осі труби.

6.12 Коаксіальний кабель складається з внутрішнього і зовнішнього циліндрів радіусами відповідно $R_1 = 2$ мм і $R_2 = 4$ мм. Уздовж поверхонь цих циліндрів у протилежних напрямках тече струм $I = 5$ А. Знайти напруженість магнітного поля H на відстані r від осі кабеля для випадків: 1) $r_1 = 3$ мм; 2) $r_2 = 5$ мм.

6.13 Між полюсами електромагніта створено однорідне магнітне поле, індукція якого $B = 0,1$ Тл. По дроту завдовжки $l =$

0,3 м, розміщеному перпендикулярно лініям індукції, протікає струм $I = 7$ А. Знайти силу F , що діє на дріт.

6.14 Шини електростанції є паралельними мідними смугами завдовжки $l = 3$ м, що знаходяться на відстані $d = 0,5$ м одна від одної. При короткому замиканні по них тече струм $I = 10^4$ А. З якою силою F взаємодіють при цьому шини?

6.15 Два прямолінійні довгі паралельні провідники знаходяться на відстані $d_1 = 10$ см один від одного. Струми, що протікають по провідниках в одному напрямку, дорівнюють відповідно $I_1 = 1$ А і $I_2 = 2$ А. Яку роботу потрібно виконати, щоб розсунути провідники до відстані $d_2 = 20$ см? (Роботу розрахувати на одиницю довжини провідників).

6.16 В однорідному магнітному полі, напруженість якого $H = 10^3$ А/м, знаходиться квадратна рамка. Її площина створює з напрямком магнітного поля кут $\theta = 30^\circ$. Сторона рамки $a = 2$ см. Визначити магнітний потік Φ , що пронизує рамку.

6.17 Тороїд квадратного перерізу містить $N = 100$ витків дроту. Зовнішній діаметр тороїда $d_1 = 40$ см, внутрішній $d_2 = 20$ см. Знайти магнітний потік Φ в тороїді, якщо по його обмотці протікає струм $I = 10$ А.

6.18 Нескінченно довгий дріт, по якому протікає струм $I = 10$ А, і квадратна рамка зі стороною $a = 5$ см розташовані в одній площині (рисунок 6.1). Відстань від дроту до найближчої паралельної дроту сторони рамки $b = 2$ см. Знайти магнітний потік Φ , що пронизує рамку.

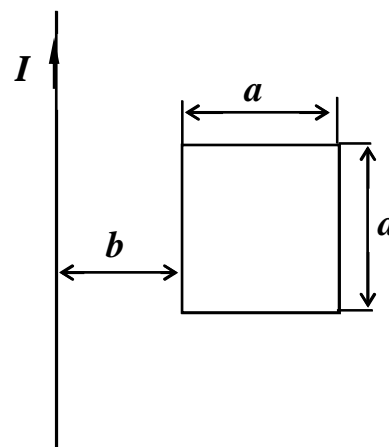


Рисунок 6.1

6.19 Плоский квадратний контур зі стороною $a = 10$ см, по якому протікає струм $I = 1$ А, вільно встановився в однорідному магнітному полі індукцією $B = 1$ Тл. Яку роботу A потрібно виконати, щоб повернути контур на кут $\alpha = 90^\circ$ навколо осі, що лежить в площині контура?

6.20 Круговий контур радіусом $R=1$ см, по якому тече струм $I=2$ А, знаходиться в однорідному магнітному полі індукцією $B=0,1$ Тл. Площина контура перпендикулярна лініям індукції. Яку роботу A потрібно виконати, щоб, обертаючи контур, розташувати його площину паралельно лініям індукції?

6.2 Рух заряджених частинок у магнітному полі

• Сила, що діє в магнітному полі індукцією B на заряд q , що рухається зі швидкістю v (сила Лоренца):

$$F_{\text{л}} = qvB \cdot \sin(\vec{v}, \vec{B}). \quad (6.13)$$

6.21 α -частинка, швидкість якої $v=10^6$ м/с, влітає в однорідне магнітне поле індукцією $B=10$ Тл перпендикулярно лініям поля. Знайти силу F , яка діє на α -частинку, радіус кола R , по якому вона рухатиметься, і період T обертання по цьому колу. Заряд α -частинки $q=3,2 \cdot 10^{-19}$ Кл, маса $m=6,7 \cdot 10^{-27}$ кг.

6.22 Електрон, прискорений напругою $U=10^5$ В, влітає в однорідне магнітне поле перпендикулярно лініям індукції. Знайти радіус траєкторії електрона і частоту його обертання по орбіті, якщо індукція магнітного поля $B=2$ Тл. Заряд електрона $e=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, його маса $m=9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

6.23 Циклотрон призначений для прискорення протонів до енергії $W=5$ МеВ. Який повинен бути радіус R дуантів циклотрона, якщо індукція магнітного поля в циклотроні $B=1$ Тл?

6.24 Електрон, прискорений напругою $U=300$ В, рухається паралельно прямолінійному провіднику на відстані $d=4$ мм від нього. По провіднику тече струм $I=5$ А. Знайти силу F , що діє на електрон.

6.25 У деякій області простору співіснують однорідне електричне поле напруженістю $E=300$ В/м і однорідне магнітне поле індукцією $B=0,1$ Тл. Вектори \vec{E} і \vec{B} взаємно

перпендикулярні. Якими повинні бути напрямок і модуль швидкості електрона \vec{v} , щоб він рухався в цих полях прямолінійно?

6.3 Явище електромагнітної індукції. Енергія магнітного поля

- ЕРС індукції в контурі, що пронизується потоком Φ (закон Фарадея):

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (6.14)$$

- ЕРС індукції в прямому провіднику завдовжки l , що рухається в магнітному полі зі швидкістю \vec{v} , спрямованою перпендикулярно його довжині:

$$\varepsilon_i = Blv \cdot \sin(\widehat{\vec{B}, \vec{v}}). \quad (6.15)$$

- Кількість індукованої електрики (електричний заряд) в контурі опором R при зміні потоку, що його пронизує, на $\Delta\Phi$:

$$q = -\frac{\Delta\Phi}{R}. \quad (6.16)$$

- ЕРС самоіндукції, що виникає в провіднику, по якому тече змінний струм I :

$$\varepsilon_c = -L \frac{dI}{dt}, \quad (6.17)$$

де L – коефіцієнт самоіндукції (*індуктивність*) цього провідника.

- Індуктивність соленоїда:

$$L = \mu_0 \mu \cdot n^2 V, \quad (6.18)$$

де V – об'єм соленоїда, n – число витків на одиницю його довжини.

- Закон зміни струму з часом при замиканні кола, що містить індуктивність:

$$I = I_0(1 - e^{-\frac{R}{L}t}), \quad (6.19)$$

де $I_0 = \varepsilon / R$, ε – ЕРС джерела струму, R – опір ланцюга.

- Закон зміни струму при розмиканні кола:

$$I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t}, \quad (6.20)$$

де I_0 – сила струму у момент часу $t = 0$.

- Енергія магнітного поля струму:

$$W_m = \frac{LI^2}{2}. \quad (6.21)$$

- Об'ємна густина енергії магнітного поля:

$$w_m = \frac{BH}{2} = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2}. \quad (6.22)$$

6.26 Кругла рамка радіусом $R = 5$ мм знаходиться в однорідному магнітному полі індукцією $B = 0,5$ Тл. Площина рамки перпендикулярна вектору \vec{B} . Чому буде дорівнювати середнє значення індукованої ЕРС ε , якщо за час $\Delta t = 0,5$ с рамка обернеться на кут $\alpha = 180^\circ$ навколо осі, що лежить в площині рамки?

6.27 Квадратна рамка з мідного дроту діаметром $d = 1$ мм знаходиться у магнітному полі, індукція якого змінюється з часом згідно із законом $B(t) = B_0 \cdot \sin \omega t$, де $B_0 = 0,01$ Тл, $\omega = 314$ с⁻¹. Площа рамки $S = 25$ см². Площина рамки перпендикулярна вектору \vec{B} . Знайти залежність від часу і найбільше значення: 1) магнітного потоку Φ , що пронизує рамку; 2) ЕРС індукції ε , що виникає в рамці; 3) сили струму I , що протікає по рамці. Питомий опір міді $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

6.28 Котушка з $N = 300$ витків, що має площу поперечного перерізу $S = 100$ см², обертається в магнітному полі індукцією

$B = 0,5$ Тл з частотою $n = 1800$ об/хв. Чому дорівнює амплітуда індукованої в котушці ЕРС?

6.29 Котушка з $N = 1000$ витків, що має площу поперечного перерізу $S = 100$ см², розташована перпендикулярно вектору \vec{B} магнітного поля Землі, повертається за $t = 1$ с на кут $\alpha = 90^\circ$. У котушці за цей час наводиться ЕРС із середнім значенням $\varepsilon_{\text{сеп}} = 0,6$ В. Знайти значення вектора \vec{B} магнітного поля Землі.

6.30 Визначити електрорушійну силу індукції ε , що виникає на кінцях крил літака, швидкість якого $v = 950$ км/год, а розмах крил $l = 12,5$ м. Вертикальна складова індукції магнітного поля Землі $B = 4 \cdot 10^{-5}$ Тл.

6.31 В магнітному полі, індукція якого $B = 0,5$ Тл, обертається стрижень завдовжки $l = 1$ м з постійною кутовою швидкістю $\omega = 20$ рад/с. Вісь обертання проходить через кінець стрижня паралельно до ліній індукції магнітного поля. Знайти ЕРС індукції ε , що виникає на кінцях стрижня.

6.32 Горизонтальний металевий стрижень завдовжки $l = 60$ см обертається навколо вертикальної осі, що проходить на відстані $x = l/3$ від його кінця. Частота обертання $n = 2$ об/с. Визначити різницю потенціалів між кінцями стрижня, якщо вертикальна складова напруженості земного магнітного поля $H_g = 40$ А/м.

6.33 На соленоїд завдовжки $l = 20$ см і площею поперечного перерізу $S = 30$ см² надітий дротяний виток. Число витків соленоїда $N = 320$, струм в соленоїді $I = 3$ А. Яка середня ЕРС індукується в надітому на соленоїд витку, коли струм в соленоїді вимикається протягом проміжку часу $\Delta t = 0,001$ с?

6.34 Дротяний виток радіусом $r = 4$ см опором $R = 0,1$ Ом поміщений в однорідне магнітне поле індукцією $B = 0,04$ Тл. Площина витка складає з лініями поля кут $\beta = 30^\circ$. Який заряд q протече по витку, якщо магнітне поле зникне?

6.35 Магнітний потік через нерухомий контур опором $R = 10$ Ом змінюється протягом часу $\tau = 5$ с згідно із законом

$\Phi(t) = 4t \cdot (\tau - t)$. Знайти кількість теплоти Q , яка виділяється в контурі за цей час. Індуктивністю контура нехтувати.

6.36 Визначити індуктивність L котушки, що має $N = 400$ витків дроту на довжині $l = 20$ см. Площа поперечного перерізу котушки $S = 9$ см². Якою буде індуктивність цієї котушки, якщо в ній буде залізне осердя? Вважати, що магнітна проникність заліза $\mu = 400$.

6.37 Потрібно виготовити соленоїд індуктивністю $L = 0,01$ Гн і довжиною $l = 20$ см з дроту діаметром $d = 0,6$ мм. Витки щільно прилягають один до одного. Якою повинна бути площа поперечного перерізу соленоїда S ?

6.38 З якого числа витків N дроту складається одношарова обмотка котушки, індуктивність якої $L = 1$ мГн? Діаметр котушки $D = 4$ см, діаметр дроту $d = 0,5$ мм. Витки щільно прилягають один до одного.

6.39 Телевізійний кабель складається з двох дротів, один з яких (внутрішній) є суцільним циліндром, другий (зовнішній) – порожнистим циліндром; осі їх співпадають. Радіус першого дроту $r_1 = 0,2$ мм, другого – $r_2 = 2$ мм. Визначити індуктивність L такого кабеля, що має довжину $l = 10$ м.

6.40 За який проміжок часу Δt в соленоїді з індуктивністю $L = 240$ Гн відбувається наростання струму від нуля до $I = 11,4$ А, якщо при цьому виникає ЕРС самоіндукції $\varepsilon_c = 30$ В?

6.41 Через котушку індуктивністю $L = 0,021$ Гн протікає струм, що змінюється з часом згідно із законом $I(t) = I_0 \cdot \sin \omega t$, де $I_0 = 5$ А, $\omega = 314$ с⁻¹. Знайти залежність від часу: 1) ЕРС самоіндукції ε_c , що виникає в котушці; 2) енергії магнітного поля котушки W_m .

6.42 Обмотка електромагніта має опір $R = 10$ Ом, індуктивність $L = 0,2$ Гн і знаходиться під напругою. Протягом якого проміжку часу Δt в обмотці виділиться кількість теплоти Q , що дорівнює енергії магнітного поля W_m в осерді?

6.43 Визначити енергію магнітного поля W_m в залізному осерді об'ємом $V = 400 \text{ см}^3$, якщо індукція поля $B = 1,2 \text{ Тл}$ (Вважати, що магнітна проникність заліза $\mu = 400$).

6.44 Котушка має опір $R = 10 \text{ Ом}$ та індуктивність $L = 0,144 \text{ Гн}$. Через скільки часу t після підключення до джерела струму в котушці встановиться струм I , що дорівнює половині сталого значення струму I_0 ?

6.45 Є котушка, індуктивність якої $L = 0,2 \text{ Гн}$ і опір $R = 1,64 \text{ Ом}$. У скільки разів зменшиться струм I в котушці через час $t = 0,05 \text{ с}$ після того, як котушку відключили від джерела струму і замкнули накоротко?

6.4 Електромагнітне поле. Рівняння Максвелла

- Рівняння Максвелла в інтегральній і диференціальній формах:

$$1) \oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}, \quad \text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (6.23)$$

$$2) \oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0, \quad \text{div } \vec{B} = 0, \quad (6.24)$$

$$3) \oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}, \quad \text{rot } \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad (6.25)$$

$$4) \oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV, \quad \text{div } \vec{D} = \rho. \quad (6.26)$$

- Вектор Пойнтінга:

$$\vec{S} = w \cdot \vec{v} = \vec{E} \times \vec{H}, \quad (6.27)$$

де $w = \frac{ED}{2} + \frac{BH}{2}$ – об'ємна густина енергії, що переноситься електромагнітною хвилею; \vec{v} – швидкість хвилі.

6.46 Напруженість електричного поля задана вектором $\vec{E} = -a \cdot (y\vec{i} - x\vec{j})$, де $a = \text{const}$. Чи є це поле невихровим, тобто потенціальним? Це поле має джерела чи стоки? Знайти

циркуляцію вектора \vec{E} по колу радіусом R , що лежить в площині XOY з центром в початку координат.

6.47 Плоский конденсатор складається з двох однакових металевих дисків, відстань між якими d мала у порівнянні з розмірами дисків. Простір між обкладинками конденсатора заповнений діелектриком проникністю ε . До обкладинок прикладена змінна напруга $U(t) = U_0 \cdot \sin \omega t$. Знайти густину струму зміщення j_{zm} й індукцію магнітного поля B у просторі між обкладинками.

6.48 До плоского повітряного конденсатора, обкладинки якого мають форму дисків радіусом $R = 6$ см, прикладена змінна синусоїдальна напруга частотою $\omega = 10^3$ с⁻¹. Знайти відношення амплітудних значень енергії електричного W_{mE} і магнітного W_{mB} полів усередині конденсатора.

6.49 Змінний синусоїдальний струм частотою $\omega = 10^3$ с⁻¹ тече по обмотці прямого соленоїда, радіус перерізу якого $R = 6$ см. Знайти відношення амплітудних значень енергії електричного W_{mE} і магнітного W_{mB} полів усередині соленоїда.

6.50 Напруженість магнітного поля задана співвідношенням $\vec{H} = -a \cdot (y\vec{i} - x\vec{j})$, де $a = const$. Визначити: а) густину струму j , який створює це поле; б) циркуляцію вектора \vec{H} по колу радіусом R , яке лежить в площині XOY з центром в початку координат.

6.51 Напруженість електричного поля у вакуумі задана функцією $\vec{E} = x\vec{i} + 2y^2\vec{j} + 3z^3\vec{k}$. Знайти об'ємну густину вільного заряду ρ , який створює це поле, в кожній точці простору (x, y, z) .

6.52 Знайти середнє значення вектора Пойнтінга $\vec{S}_{сер}$ плоскої електромагнітної хвилі у вакуумі, електрична складова якої $\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r})$.

7 Хвильова оптика

7.1 Інтерференція світла

- Оптична довжина шляху променя світла в середовищі:

$$l = n \cdot l_0, \quad (7.1)$$

де n – абсолютний показник заломлення середовища, l_0 – геометрична довжина шляху.

- Відстань між інтерференційними максимумами на екрані, розташованому паралельно двом когерентним джерелам світла:

$$\Delta x = \frac{D}{l} \lambda, \quad (7.2)$$

де λ – довжина хвилі світла; D – відстань від екрана до джерел світла, відстань між якими l ; при цьому $D \gg l$.

- Результат інтерференції світла в плоскопаралельній пластинці (для відбитого світла):

підсилення світла

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} = (2\kappa + 1)\frac{\lambda}{2} \quad (\kappa = 0, 1, 2, \dots), \quad (7.3)$$

послаблення світла

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} = \kappa\lambda \quad (\kappa = 0, 1, 2, \dots), \quad (7.4)$$

де d – товщина пластинки, n – показник заломлення, i – кут падіння променів на пластинку, λ – довжина хвилі світла.

Для випадку *проходження* світла через лінзу та пластинку умови підсилення й послаблення світла зворотні умовам для *відбитого* світла.

• Радіуси *світлих кілець Ньютона* (у випадку проходження світла) визначаються формулою

$$r_k = \sqrt{\kappa R \lambda} \quad (\kappa = 1, 2, \dots), \quad (7.5)$$

радіуси *темних кілець*:

$$r_k = \sqrt{(2\kappa - 1)R \frac{\lambda}{2}} \quad (\kappa = 1, 2, \dots), \quad (7.6)$$

де R – радіус кривизни лінзи.

У відбитому світлі темні й світлі кільця міняються місцями – на місці темних кілець розташовуються світлі, й навпаки.

7.1 У досліді Юнга відстань між щілинами $l = 0,5$ мм, а довжина хвилі $\lambda = 550$ нм. Яка відстань D від щілин до екрана, якщо відстань між сусідніми темними смугами на ньому $\Delta x = 1$ мм?

7.2 У скільки разів збільшиться відстань Δx між сусідніми інтерференційними смугами на екрані в досліді Юнга, якщо зелений світлофільтр, що пропускає світло довжиною хвилі $\lambda_1 = 500$ нм, замінити на червоний ($\lambda_2 = 650$ нм)?

7.3 У досліді Юнга отвори освітлюються монохроматичним світлом ($\lambda = 600$ нм), відстань між отворами $l = 1$ мм, відстань від отворів до екрана $D = 3$ м. Знайти відстані x від центральної світлої смуги до перших трьох інтерференційних максимумів на екрані.

7.4 У досліді Юнга на шляху одного з інтерферуючих променів перпендикулярно йому міститься скляна пластинка

товщиною $d = 12$ мкм. Визначити, на скільки смуг зміститься інтерференційна картина, якщо показник заломлення скла $n = 1,5$, а довжина хвилі світла $\lambda = 750$ нм.

7.5 Якою повинна бути товщина скляної пластинки d (показник заломлення $n = 1,6$), щоб із введенням пластинки на шляху одного з інтерферуючих променів картина інтерференції на екрані змістилася на $N = 4$ смуги? Довжина хвилі світла $\lambda = 550$ нм.

7.6 Для спостереження інтерференції від дзеркал Френеля два плоских дзеркала розташували під кутом $\varphi = 0,005$ рад на відстані $L = 4,9$ м від екрана й $r = 0,1$ м від вузької щілини, що паралельна обом дзеркалам і служить джерелом світла. Відстань між сусідніми темними смугами на екрані $\Delta x = 2,5$ мм. Знайти довжину хвилі світла λ .

7.7 Дзеркала Френеля розташовані так, що ребро між ними знаходиться на відстані $r = 0,2$ м від паралельної йому щілини, яка служить джерелом світла, і на відстані $L = 1,8$ м від екрана. Який кут φ повинні утворювати дзеркала, щоб на екрані відстань від довільної першої до п'ятої темної смуги, на яку припадає $m = 4$ світлих смуг, дорівнювала $\Delta x = 14$ мм при освітленні червоним світлом, довжина хвилі якого $\lambda = 700$ нм?

7.8 На мильну плівку (показник заломлення $n = 1,33$) падає біле світло під кутом $\alpha = 45^\circ$. При якій найменшій товщині плівки d відбиті промені будуть мати жовтий колір ($\lambda = 600$ нм)?

7.9 У дуже тонкій клиноподібній пластинці у відбитому світлі при його нормальному падінні спостерігаються інтерференційні смуги. Відстань між сусідніми темними смугами $\Delta x = 5$ мм. Знаючи, що довжина світлової хвилі $\lambda = 580$ нм, а показник заломлення пластинки $n = 1,5$, знайти кут φ між гранями пластинки.

7.10 На скляний клин падає нормально пучок світла довжиною хвилі $\lambda = 582$ нм. Кут при вершині клина $\theta = 20'$. Яке

число темних інтерференційних смуг припадає на довжину $l = 1$ см клина? Показник заломлення скла $n = 1,5$.

7.11 Для спостереження кілець Ньютона використовують плоскоопуклу лінзу (радіус кривизни $R = 160$ см), що дотикається до плоскої скляної пластинки. Знайти радіуси r четвертого і дев'ятого темних кілець у відбитому світлі, довжина хвилі якого $\lambda = 625$ нм.

7.12 Радіус кривизни плоскоопуклої лінзи $R = 4$ м. Чому дорівнює довжина хвилі λ падаючого світла, якщо радіус п'ятого ($m = 5$) світлого кільця Ньютона у відбитому світлі $r_5 = 3,6$ мм?

7.13 Як зміняться радіуси кілець Ньютона r_k , якщо в установці для їхнього спостереження простір між лінзою й пластинкою заповнити водою (показник заломлення $n = 1,33$)?

7.2 Дифракція світла

- Положення максимумів освітленості при дифракції від щілини, на яку нормально падає пучок паралельних променів, визначається умовою

$$a \cdot \sin \varphi = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (k = 1, 2, \dots), \quad (7.7)$$

де a – ширина щілини, φ – кут дифракції, λ – довжина хвилі світла.

- При нормальному падінні світла на дифракційну решітку максимуми освітленості спостерігаються в напрямках, що становлять із нормаллю до решітки кут φ , що задовольняє умову

$$d \cdot \sin \varphi = k\lambda, \quad (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (7.8)$$

де d – стала ґратки, k – порядок спектра.

- Кутова дисперсія дифракційної решітки:

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda}. \quad (7.9)$$

- Роздільна здатність дифракційної решітки:

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \kappa N, \quad (7.10)$$

де N – загальне число щілин решітки; κ – порядок спектра; λ і $\lambda + \Delta\lambda$ – довжини хвиль двох близьких спектральних ліній, які ця решітка ще дозволяє бачити окремо.

7.14 Дифракційна картина спостерігається на екрані, розташованому на відстані l від точкового джерела монохроматичного світла (довжина хвилі $\lambda = 0,6$ мкм). На відстані $d = l/2$ від джерела розміщений непрозорий круглий диск діаметром $D = 1$ см, що закриває центральну зону Френеля. Знайти відстань l від джерела до екрана.

7.15 Паралельний пучок променів від монохроматичного джерела ($\lambda = 0,6$ мкм) падає нормально на діафрагму з круглим отвором діаметром $d = 6$ мм. За діафрагмою на відстані $R = 3$ м від неї заходиться екран. Скільки зон Френеля укладається в отворі діафрагми? Яким буде центр дифракційної картини на екрані – темним чи світлим?

7.16 Обчислити радіуси r_k перших п'яти зон Френеля для випадку плоскої хвилі. Відстань від хвильової поверхні до точки спостереження $R = 1$ м, довжина хвилі $\lambda = 500$ нм.

7.17 На щілину падає нормально паралельний пучок монохроматичного світла (довжина хвилі $\lambda = 600$ нм). Знайти кут φ , під яким буде спостерігатися третій дифракційний мінімум, якщо ширина щілини $a = 3 \cdot 10^{-6}$ м.

7.18 Знайти період d дифракційної решітки за умови, що зелена лінія випромінювання ртуті в спектрі першого порядку (довжина хвилі $\lambda = 546,1$ нм) спостерігається під кутом $\varphi = 19^\circ 6'$.

7.19 На дифракційну решітку нормально падає пучок світла від розрядної трубки. Чому повинен дорівнювати період дифракційної решітки, щоб у напрямку $\varphi = 41^\circ$ збігалися максимуми двох спектральних ліній $\lambda_1 = 656,3$ нм і $\lambda_2 = 410,2$ нм?

7.20 Визначити кутову дисперсію D дифракційної решітки для довжини хвилі $\lambda = 589$ нм в спектрі першого порядку. Період дифракційної решітки $d = 2,5 \cdot 10^{-6}$ м.

7.21 Кутова дисперсія дифракційної решітки для довжини хвилі $\lambda = 668$ нм в спектрі першого порядку $D = 2,02 \cdot 10^5$ рад/м. Знайти період дифракційної решітки d .

7.22 Для якої довжини хвилі λ дифракційна решітка має кутову дисперсію $D = 6,3 \cdot 10^5$ рад/м в спектрі третього порядку? Період решітки $d = 5$ мкм.

7.23 Дифракційна решітка шириною $l = 2,5$ см має період $d = 2$ мкм. Яку різницю довжин хвиль $\Delta\lambda$ дозволяє спостерігати ця решітка в ділянці жовтих променів ($\lambda = 600$ нм) у спектрі другого порядку?

7.24 Чому дорівнює період дифракційної решітки d , якщо в першому порядку спектра вона дозволяє спостерігати лінії натрію $\lambda_1 = 589$ нм і $\lambda_2 = 589,6$ нм? Ширина дифракційної решітки $l = 2,5$ см.

7.25 Чому дорівнює ширина l дифракційної решітки періодом $d = 2 \cdot 10^{-6}$ м, якщо вона дозволяє спостерігати в першому порядку спектра лінії калію $\lambda_1 = 404,4$ нм і $\lambda_2 = 404,7$ нм?

7.3 Поляризація світла

• Повна поляризація світла, відбитого від діелектрика, показник заломлення якого n_2 , у середовище, показник заломлення якого n_1 , має місце при куті падіння i_B (кут Брюстера), який відповідає співвідношенню

$$\operatorname{tg} i_B = \frac{n_2}{n_1}. \quad (7.11)$$

- Закон Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha, \quad (7.12)$$

де I – інтенсивність світла, що пройшло крізь поляризатор і аналізатор, площини поляризації яких утворюють кут α ; I_0 – інтенсивність поляризованого світла, що падає на аналізатор.

- Кут повороту площини поляризації:

$$\alpha = D \cdot l_0, \quad (7.13)$$

де D – стала обертання, що залежить від природи речовини й довжини хвилі світлових променів; l_0 – довжина шляху світлового променя в речовині.

7.26 Чому дорівнює показник заломлення скла n , якщо при відбиванні від нього світла відбитий промінь буде повністю поляризований при куті заломлення $\beta = 30^\circ$?

7.27 Визначити кут Брюстера при відбиванні від дна скляної посудини, наповненої водою, показник заломлення якої $n_1 = 1,33$. Посудина виготовлена із кронгласу з показником заломлення $n_2 = 1,5$.

7.28 Граничний кут повного внутрішнього відбивання для деякої речовини $\beta_0 = 45^\circ$. Чому дорівнює для цієї речовини кут повної поляризації α_B ?

7.29 Чому дорівнює кут α між головними площинами поляризатора й аналізатора, якщо інтенсивність світла I , що пройшло через поляризатор й аналізатор, у $k = 4$ рази менша інтенсивності неполяризованого світла I_0 , що падає на поляризатор? Поглинанням світла в поляризаційних приладах знехтувати.

7.30 Один поляроїд пропускає 30% світла, якщо на нього падає природне світло. Після проходження світла через два таких поляроїди інтенсивність зменшується до 9%. Знайти кут α між осями поляроїдів.

7.31 Визначити товщину d кварцової пластинки, при проходженні крізь яку плоскополяризованого світла довжиною хвилі $\lambda = 509$ нм площина його поляризації обертається на кут $\varphi = 180^\circ$. Стала обертаня у кварці для цієї довжини хвилі $D = 29,7$ град/мм.

7.32 Паралельний пучок світла падає нормально на пластинку ісландського шпату, вирізану паралельно оптичній осі. Визначити різницю оптичних шляхів Δl звичайного й незвичайного променів, що пройшли через пластинку. Товщина пластинки $d = 0,03$ мм, показники заломлення звичайного й незвичайного променів: $n_o = 1,658$, $n_e = 1,486$.

8 Теплове випромінювання. Квантова природа світла

8.1 Закони теплового випромінювання

- Енергетична світність чорного тіла – енергія, випромінювана за одиницю часу одиницею його поверхні. За *законом Стефана-Больцмана* вона дорівнює:

$$R_r = \sigma T^4, \quad (8.1)$$

де $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – стала Стефана-Больцмана, T – температура тіла, К.

- Закон зміщення Віна:

$$\lambda_m \cdot T = b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}, \quad (8.2)$$

де λ_m – довжина хвилі, на яку припадає максимум спектральної густини енергетичної світності чорного тіла.

8.1 Потужність випромінювання чорного тіла $P = 34$ кВт. Знайти температуру T цього тіла, якщо відомо, що площа його поверхні $S = 0,6$ м².

8.2 Енергетична світність чорного тіла $R_T = 3$ Вт/см². Визначити довжину хвилі λ_m , на яку припадає максимум спектральної густини його енергетичної світності.

8.3 Випромінювання Сонця за своїм спектральним складом близьке до випромінювання чорного тіла, для якого максимум спектральної густини його енергетичної світності припадає на довжину хвилі $\lambda_m = 0,48$ мкм. На яку величину зменшується маса Сонця, яку воно втрачає кожної секунди за рахунок випромінювання. Оцінити час t , за який маса Сонця зменшиться на 1%. Маса Сонця $m_c = 1,99 \cdot 10^{30}$ кг, радіус Сонця $r_c = 6,96 \cdot 10^8$ м.

8.4 Є два чорних джерела теплового випромінювання. Температура одного з них $T_1 = 2500$ К. Знайти температуру другого джерела T_2 , якщо довжина хвилі λ_{m_2} , що відповідає максимуму спектральної густини його енергетичної світності, на $\Delta\lambda = 0,5$ мкм більша ніж відповідна довжина хвилі λ_{m_1} першого джерела.

8.5 Знайти кількість енергії W , яку випромінює чорне тіло за $t = 1$ с із площі $S = 1$ см² своєї поверхні, якщо відомо, що максимальна спектральна густина його енергетичної світності припадає на довжину хвилі $\lambda_m = 484$ нм.

8.6 При нагріванні чорного тіла довжина хвилі, на яку припадає максимум спектральної густини його енергетичної світності, змінилася від $\lambda_{m_1} = 690$ нм до $\lambda_{m_2} = 500$ нм. У скільки разів збільшилась при цьому випромінювана потужність та яка температура тіла T_2 після нагрівання?

8.7 Температура чорного тіла збільшилася в $n = 2$ рази, в результаті чого довжина хвилі λ_m , на яку припадає максимум спектральної густини його енергетичної світності, зменшилася на $\Delta\lambda = 0,6$ мкм. Визначити початкову T_1 і кінцеву T_2 температури тіла.

8.8 Температура навколишнього середовища $t_0 = 20^\circ\text{C}$. Яку енергію потрібно щомиті підводити до зачорненої кульки радіусом $r = 2$ см, щоб підтримувати її температуру на рівні $t = 47^\circ\text{C}$? Вважати, що тепло кулька втрачає тільки внаслідок випромінювання.

8.9 Поверхня тіла була нагріта до температури $T = 1000$ К. Потім одну половину цієї поверхні нагріли ще на $\Delta T = 100$ К, а іншу половину остудили на $\Delta T = 100$ К. У скільки разів змінилася повна енергія W , випромінювана тілом за одиницю часу?

8.2 Фотоелектричний ефект. Фотони

- Енергія фотона:

$$\varepsilon = h\nu, \quad (8.3)$$

де $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка, ν – частота.

- Імпульс фотона:

$$p_\phi = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}, \quad (8.4)$$

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

- Рівняння Ейнштейна для фотоефекту:

$$h\nu = A + \frac{m\nu_{\max}^2}{2}, \quad (8.5)$$

де A – робота виходу електрона з металу, m і ν_{\max} – маса і максимальна швидкість електрона.

8.10 Визначити енергію ε одного фотона: а) для червоного світла (довжина хвилі $\lambda_1 = 600$ нм); б) для рентгенівських променів (довжина хвилі $\lambda_2 = 0,1$ нм).

8.11 Визначити енергію ε та імпульс p фотона, якому відповідає довжина хвилі $\lambda = 0,016$ нм.

8.12 З якою швидкістю ν повинен рухатися електрон, щоб його кинетична енергія W_k дорівнювала енергії фотона, якому

відповідає довжина хвилі $\lambda = 500 \text{ нм}$? Маса електрона $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$.

8.13 З якою швидкістю v повинен рухатися електрон, щоб його імпульс p дорівнював імпульсу фотона, якому відповідає довжина хвилі $\lambda = 500 \text{ нм}$?

8.14 Знайти довжину хвилі λ та імпульс p фотона, енергія якого дорівнює енергії електрона, прискореного напругою $U = 50 \text{ кВ}$.

8.15 Вважаючи, що середня довжина хвилі випромінювання лампи розжарювання $\lambda = 1,2 \text{ мкм}$, знайти число фотонів N , які випромінюються за t с лампою потужністю $P = 200 \text{ Вт}$.

8.16 Червона межа фотоефекту для деякого металу $\lambda_{\text{max}} = 275 \text{ нм}$. Чому дорівнює мінімальне значення енергії фотона ε_{min} , що викликає фотоефект? Знайти: 1) роботу виходу A електрона з цього металу; 2) максимальну швидкість v_{max} електронів, що вириваються з цього металу світлом довжиною хвилі $\lambda = 180 \text{ нм}$.

8.17 Визначити найбільшу довжину світлової хвилі λ_{max} , при якій спостерігається фотоефект: а) у платини (робота виходу $A_1 = 5,3 \text{ еВ}$); б) у цезію ($A_2 = 1,9 \text{ еВ}$).

8.18 Визначити максимальну швидкість v_m електрона, що вилетів із цезію при опроміненні його фіолетовим світлом (довжина хвилі $\lambda = 400 \text{ нм}$). Робота виходу електрона із цезію $A = 1,9 \text{ еВ}$.

8.19 Знайти частоту світла ν , яке вириває з поверхні металу електрони, що повністю затримуються напругою $U_3 = 3 \text{ В}$. Фотоефект у цього металу починається при частоті падаючого світла $\nu_0 = 6 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$. Знайти роботу виходу A електрона з цього металу.

8.20 Червона межа фотоефекту для деякого металу $\lambda_{\text{max}} = 400 \text{ нм}$. Знайти затримуючу напругу U_3 при опроміненні цього металу ультрафіолетовим світлом (довжина хвилі $\lambda = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$).

8.21 Визначити сталу Планка h , якщо відомо, що фотоелектрони, що вириваються з поверхні деякого металу світлом, частота якого $\nu_1 = 2,2 \cdot 10^{15}$ Гц, повністю затримуються напругою $U_{3,1} = 6,6$ В, а ті, що вириваються світлом частотою $\nu_2 = 4,6 \cdot 10^{15}$ Гц, – напругою $U_{3,2} = 16,5$ В.

8.22 Кванти світла енергією $\varepsilon = 4,9$ еВ виривають фотоелектрони з металу, для якого робота виходу $A = 4,5$ еВ. Знайти максимальний імпульс p_{\max} , переданий поверхні металу при вилітанні кожного електрона.

8.3 Гальмівне рентгенівське випромінювання. Ефект Комптона. Тиск світла

- Короткохвильова границя гальмівного рентгенівського випромінювання:

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eU}, \quad (8.6)$$

де e – заряд електрона; U – напруга, прикладена до рентгенівської трубки (прискорювальна різниця потенціалів, яку проходить електрон).

- Зміна довжини хвилі рентгенівських променів при комптонівському розсіюванні (розсіюванні на вільному електроні):

$$\Delta\lambda = \lambda_c(1 - \cos\varphi), \quad (8.7)$$

де $\lambda_c = \frac{h}{m_e c} = 2,4$ пм – комптонівська довжина хвилі, φ – кут розсіювання, m_e – маса електрона.

- Світловий тиск (при дзеркальному відбиванні й нормальному падінні):

$$p = \frac{w}{c}(1 + \rho), \quad (8.8)$$

де w – кількість енергії, що падає у вигляді випромінювання на одиницю по-верхні тіла за одиницю часу; ρ – коефіцієнт дзеркального відбивання світла.

8.23 Знайти короткохвильову границю безперервного (суцільного) рентгенівського спектра λ_{\min} , якщо до рентгенівської трубки прикладена напруга $U = 50$ кВ. Заряд електрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, швидкість світла $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, стала Планка $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

8.24 Довжина хвилі гамма-випромінювання радіо-С $\lambda = 1,6 \cdot 10^{-12}$ м. Яку напругу U потрібно прикласти до рентгенівської трубки, щоб одержати рентгенівські промені такої довжини хвилі? Заряд електрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

8.25 Знайти довжину хвилі λ_{\min} короткохвильової границі гальмівного рентгенівського спектра, якщо відомо, що після збільшення напруги U на рентгенівській трубці в $n = 2$ рази ця довжина хвилі змінилася на $\Delta\lambda = 50$ пм.

8.26 До електродів рентгенівської трубки прикладена прискорювальна напруга $U = 60$ кВ. Найменша довжина хвилі рентгенівських променів, які випромінює ця трубка, $\lambda_{\min} = 2,06 \cdot 10^{-11}$ м. Знайти на підставі цих даних сталу Планка.

8.27 Яка довжина хвилі рентгенівського випромінювання λ_0 , якщо при комптонівському розсіюванні цього випромінювання графітом під кутом $\varphi = 60^\circ$ довжина хвилі випромінювання, що розсіюється, дорівнює $\lambda = 2,54 \cdot 10^{-11}$ м?

8.28 Рентгенівські промені, довжина хвилі яких $\lambda_0 = 2 \cdot 10^{-11}$ м, зазнають комптонівського розсіювання під кутом $\varphi = 90^\circ$. Знайти: 1) зміну довжини хвилі $\Delta\lambda$ рентгенівських променів при розсіюванні; 2) енергію W_e електрона віддачі; 3) імпульс p_e електрона віддачі.

8.29 В ефекті Комптона енергія падаючого фотона ε_0 розподіляється порівну між фотоном, що розсіюється, та електроном віддачі. Кут розсіювання $\varphi = 90^\circ$. Знайти енергію ε та імпульс p_ϕ фотона, що розсіюється.

8.30 Енергія рентгенівського фотона $\varepsilon_0 = 0,6$ МеВ. Знайти енергію W_e електрона віддачі, якщо відомо, що довжина хвилі λ цього фотона після комптонівського розсіювання змінилася на 20%.

8.31 На поверхню площею $S = 100 \text{ см}^2$ щохвилини падає $W = 63$ Дж світлової енергії. Знайти величину світлового тиску p у випадках, коли поверхня: 1) повністю відбиває всі промені; 2) поверхня поглинає всі падаючі на неї промені.

8.32 Монохроматичний пучок світла довжиною хвилі $\lambda = 490 \text{ нм}$ падає нормально на поверхню й чинить тиск $p = 5 \cdot 10^{-6}$ Па. Скільки фотонів N падає на одиницю поверхні кожної секунди? Коефіцієнт відбивання світла від цієї поверхні $\rho = 0,25$.

8.33 Визначити тиск сонячних променів p на поверхню чорного тіла, яке знаходиться на такій же відстані від Сонця, як і Земля. Кут падіння променів $\alpha = 0$. Сонячна стала (інтенсивність сонячної радіації за межами атмосфери) $w = 1,35 \cdot 10^3$ Дж/(м²·с). Зробити такий самий розрахунок для тіла, що відбиває всі промені.

9 Атомна і ядерна фізика

9.1 Атом Бора. Хвильові властивості частинок

• Перший постулат теорії Бора воднеподібного атома (*умова стаціо-нарності орбіт*):

$$m_e v_n r_n = n \cdot \frac{h}{2\pi}, \quad (n = 1, 2, \dots), \quad (9.1)$$

де m_e – маса електрона, n – номер орбіти (*головне квантове число*), v_n – швидкість електрона на орбіті радіусом r_n , $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка.

- Другий постулат Бора:

$$\nu_{ij} = \frac{W_i - W_j}{h}, \quad (9.2)$$

де ν_{ij} – частота випромінювання при переході електрона з i -ї на j -у орбіту, W_i і W_j – енергія електрона на цих орбітах.

- Частота випромінювання для воднеподібних атомів (*узагальнена формула Бальмера*):

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = R c Z^2 \left(\frac{1}{j^2} - \frac{1}{i^2} \right), \quad (9.3)$$

де Z – порядковий номер елемента, c – швидкість світла,

$$R = \frac{m_e e^4}{8 \epsilon_0^2 h^3 c} = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}, \quad (9.4)$$

де R – стала Рідберга, e – заряд електрона, ϵ_0 – електрична стала.

- Довжина хвилі де Бройля для частинки масою m , що рухається зі швидкістю v :

$$\lambda_B = \frac{h}{mv}. \quad (9.5)$$

9.1 В моделі воднеподібного атома, запропонованій Н. Бором в 1913 р., електрон рухається по коловій орбіті навколо ядра, що має заряд $q = Ze$, де Z – порядковий номер елемента в таблиці Д.І. Менделєєва, e – заряд електрона. Стійким є рух електрона лише по тих орбітах, для яких момент імпульсу електрона кратний сталій Планка h , поділений на 2π :

$$m v r = n \frac{h}{2\pi},$$

де $n = 1, 2, 3, \dots$, m – маса електрона, v – його швидкість, r – радіус орбіти. Кожній орбіті відповідає певний рівень енергії атома W_n , так що при поглинанні атомом енергії або випромінюванні її електрон переходить з однієї орбіти на іншу.

1) Знайти радіус n -ї орбіти електрона у воднеподібному атомі r_n і швидкість електрона v_n на цій орбіті.

2) Визначити повну енергію W_n електрона на n -й орбіті, а також відношення потенціальної енергії $W_{ном}$ електрона до його кінетичної енергії W_k .

3) Обчислити довжину хвилі λ спектра випромінювання атомарного водню при переході електрона з орбіти з номером $n = 4$ на орбіту з номером $n = 2$.

4) Визначити довжину хвилі λ спектра випромінювання іона He^+ при переході електрона з орбіти з номером $n = 4$ на орбіту з номером $n = 2$.

9.2 Використовуючи теорію Бора, знайти енергію іонізації W_i атома водню, тобто роботу переміщення електрона з першої орбіти ($n = 1$) на нескінченність ($n = \infty$).

9.3 Обчислити кутову швидкість ω електрона на другій борівській орбіті іона He^+ .

9.4 Знайти для воднеподібного атома магнітний момент p_m , який відповідає руху електрона на n -й орбіті, а також відношення магнітного моменту до механічного p_m / L . Обчислити магнітний момент електрона, що перебуває на першій борівській орбіті.

9.5 Обчислити в центрі атома водню індукцію магнітного поля B , обумовленого рухом електрона по першій борівській орбіті.

9.6 Знайти зміну кінетичної енергії W_k електрона в атомі водню при випромінюванні атомом фотона довжиною хвилі $\lambda = 486$ нм.

9.7 Знайти довжину хвилі де Бройля λ_B : 1) для електронів, прискорених напругою: $U = 1; 100; 1000\text{В}$; 2) для електрона, що має швидкість $v = 10^6$ м/с; 3) для кульки масою $m = 1$ г, що рухається зі швидкістю $v = 1$ см/с.

9.8 Зарядженій частинці, прискореній напругою $U = 200$ В, відповідає довжина хвилі де Бройля $\lambda_B = 2 \cdot 10^{-12}$ м. Знайти масу m цієї частинки, якщо відомо, що її заряд q дорівнює заряду електрона ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл).

9.9 Знайти довжину хвилі де Бройля λ_B для молекули водню, швидкість якої дорівнює її найбільш імовірній швидкості v_i при температурі $t = 20^\circ\text{C}$. Молярна маса водню $M = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

9.10 При якому значенні кінетичної енергії W_k дебройлівська довжина хвилі електрона λ_B дорівнює його комптонівській довжині хвилі λ_c ?

9.11 Знайти відношення довжини n -ї колової орбіти електрона в теорії Бора до довжини хвилі де Бройля λ_B на цій орбіті.

9.12 Паралельний пучок електронів падає нормально на діафрагму з вузькою прямокутною щілиною шириною $b = 1$ мкм. Визначити швидкість цих електронів, якщо на люмінесцентному екрані, віддаленому від щілини на $l = 50$ см, ширина центрального дифракційного максимуму $\Delta x = 0,36$ мм.

9.13 Паралельний пучок електронів, прискорених напругою $U = 25$ В, падає нормально на діафрагму з двома вузькими щілинами, відстань між якими $d = 50$ мкм. Визначити відстань Δx між сусідніми максимумами дифракційної картини на люмінесцентному екрані, розташованому на відстані $l = 1$ м від щілин.

9.2 Закон радіоактивного розпаду. Енергія зв'язку ядер

- Число радіоактивних атомів, що розпадаються за проміжок часу Δt , пропорційне числу наявних атомів N і проміжку часу:

$$\Delta N = -\lambda N \cdot \Delta t = -\frac{\ln 2}{T} N \cdot \Delta t, \quad (9.6)$$

де λ – стала розпаду, T – період напіврозпаду.

- Число радіоактивних атомів, що є в наявності в момент часу t (закон радіоактивного розпаду):

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\frac{t \ln 2}{T}}, \quad (9.7)$$

де N_0 – число таких атомів при $t = 0$.

- Середній час життя радіоактивного атома:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}. \quad (9.8)$$

- Активністю радіоактивного препарату a називається число актів розпаду в 1 с (*питома активність* – число актів розпаду в одну секунду на одиницю маси речовини, що розпадається). Активність вимірюється в беккерелях:

$$[a] = \text{Бк (беккерель)} = 1/\text{с}.$$

- Якщо є N атомів, здатних до радіоактивного розпаду, то активність радіоактивного препарату:

$$a = \lambda N = \frac{N \cdot \ln 2}{T}. \quad (9.9)$$

- Залежність активності від часу виражається формулою

$$a = a_0 e^{-\lambda t} = a_0 e^{-\frac{t \ln 2}{T}}. \quad (9.10)$$

- Енергія зв'язку ядра атома:

$$\Delta W_{зв} = c^2 \Delta m, \quad (9.11)$$

де c – швидкість світла, Δm – зміна маси при утворенні ядра із протонів і нейтронів (*дефект маси*):

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}}, \quad (9.12)$$

де Z – порядковий номер елемента в таблиці Д.І.Менделєєва (число протонів у ядрі атома), N – число нейтронів у ядрі цього атома, $m_p = 1,672652307 \cdot 10^{-27}$ кг і $m_n = 1,674958839 \cdot 10^{-27}$ – маси відповідно протона й нейтрона, $m_{\text{я}}$ – маса ядра даного елемента.

9.14 Деякий радіоактивний препарат має постійну розпаду $\lambda = 1,44 \cdot 10^{-3}$ год⁻¹. Через скільки годин t розпадеться 75% початкової кількості атомів?

9.15 Знайти сталу розпаду радону λ , якщо число його атомів зменшується за добу на 18,2%. Який період напіврозпаду T радону?

9.16 Обчислити число ΔN атомів радону, що розпалися протягом першої доби, якщо початкова маса радону $m = 1$ г. Період напіврозпаду радону $T = 3,82$ діб, молярна маса $M = 0,222$ кг/моль.

9.17 Скільки атомів полонію розпадається за добу з початкової кількості атомів $N_0 = 10^6$? Період напіврозпаду полонію $T = 138$ діб.

9.18 Визначити число атомів урану ${}_{92}^{238}\text{U}$, що розпалися протягом року, якщо початкова маса урану $m = 1$ г. Період напіврозпаду урану $T = 4,5 \cdot 10^9$ років, молярна маса $M = 0,238$ кг/моль.

9.19 Яка частка N/N_0 початкової кількості радіоактивної речовини, що не розпалася, залишиться через $t = 1,5 T$, де T – період напіврозпаду.

9.20 За який проміжок часу t активність a радіоактивної речовини зменшиться в $n = 2$ рази.

9.21 Обчислити початкову активність a_0 радону і його активність a через добу. Молярна маса радону $M = 0,222$ кг/моль, період напіврозпаду $T = 3,82$ діб.

9.22 Початкова маса урану ${}^{238}_{92}\text{U}$ $m = 1$ г. Обчислити початкову активність a_0 урану і його активність a через $t = 10^6$ років.

9.23 Активність деякого радіоактивного препарату в початковий момент часу $a_0 = 450$ розп/хв. Визначити його активність в момент часу $t = 0,5 T$, де T – період напіврозпаду.

9.24 Активність a деякого радіоактивного препарату зменшується в $n = 2,5$ раз за $t = 7$ діб. Знайти його період напіврозпаду T .

9.25 Визначити вік стародавніх дерев'яних предметів, якщо відомо, що питома активність ізотопу ${}^{14}_6\text{C}$ в них становить $3/5$ питомої активності цього ізотопу в тільки що зрубаних деревах. Період розпаду ядер радіоактивного ізотопу $T = 5570$ років.

9.26 Обчислити питому енергію зв'язку (енергію зв'язку, яка припадає на один нуклон) в ядрах ${}^4_2\text{He}$, ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{31}_{14}\text{Si}$, ${}^{235}_{92}\text{U}$.

9.27 Вважаючи, що в одному акті поділу ядра ${}^{235}_{92}\text{U}$ звільняється енергія $W_0 = 200$ МеВ, визначити: 1) енергію, що виділяється при “згорянні” $m = 1$ кг ізотопу ${}^{235}_{92}\text{U}$, і масу кам'яного вугілля теплотворною здатністю $q = 30$ кДж/г, еквівалентну в тепловому відношенні 1 кг ${}^{235}_{92}\text{U}$; 2) масу ізотопу ${}^{235}_{92}\text{U}$, що зазнає поділу при вибуху атомної бомби з тротилітовим еквівалентом 30 кілотонн, якщо тепловий еквівалент тротилу $q = 4,1$ МДж/кг.

9.28 Визначити енергію реакції ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{p} \rightarrow 2 {}^4_2\text{He}$, якщо відомо, що енергії зв'язку на один нуклон у ядрах ${}^7_3\text{Li}$ і ${}^4_2\text{He}$ дорівнюють відповідно: $w_1 = 5,6$ МеВ, $w_2 = 7,06$ МеВ.

9.29 Визначити добову витрату m ізотопу ${}^{235}_{92}\text{U}$ на атомній електростанції потужністю $P=15$ МВт, якщо ККД станції $\eta=20\%$. Енергія, що виділяється при одному акті поділу ${}^{235}_{92}\text{U}$: $W_0=200$ МеВ.

Вказівки й відповіді

1 Механіка

1.1 Літак повинен підтримувати курс на південь-захід під кутом $\alpha=4^\circ$ до меридіана. Його швидкість відносно Землі $v=798$ км/год.

1.2 $v_1=0,6$ м/с, $t=250$ с.

$$\begin{aligned} \mathbf{1.18} \quad t &= \sqrt{\frac{2h}{g}} = 2,3 \text{ с}, \quad v_x = v_0, \\ v_y &= -gt, \quad s = v_0 t = 34 \text{ м}, \\ v &= \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = 27 \text{ м/с}, \end{aligned}$$

$$1.3 \quad t = \frac{S_1 v_1 + S_2 v_2}{v_1^2 + v_2^2} = 0,1 \text{ год.}$$

$$1.4 \quad v_{cep} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (1/v_i)}.$$

$$1.5 \quad v_{cep} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i.$$

$$1.6 \quad v_{cep} = c\tau^2 / 3 + b\tau / 2.$$

$$1.7 \quad t = 12,4 \text{ с}, \quad v = 2,2 \text{ м/с.}$$

$$1.8 \quad a = 2,5 \text{ м/с}^2, \quad t = 4 \text{ с.}$$

$$1.9 \quad v_0 = gt / 2 = 14,7 \text{ м/с}, \\ h = gt^2 / 8 = 11 \text{ м.}$$

$$1.10 \quad H = 40 \text{ м}, \quad t = 2,9 \text{ с}, \quad t_1 = 0,8 \text{ с.}$$

$$1.11 \quad v_1 = 20 \text{ м/с}, \quad v_2 = 10 \text{ м/с}, \\ t = 3 \text{ с.}$$

$$1.12 \quad s = 150 \text{ м.}$$

$$1.13 \quad h = 154,3 \text{ м.}$$

$$1.14 \quad s = 4,1 \cdot 10^5 \text{ м.}$$

$$1.15 \quad h = 9,6 \text{ м}, \quad v = -14,6 \text{ м/с.}$$

$$1.16 \quad h = 1238 \text{ м.}$$

$$1.17 \quad \text{а) } t = 8 \text{ с}, \quad v = 65 \text{ м/с},$$

$$\text{б) } t = 5 \text{ с}, \quad v = 65 \text{ м/с.}$$

$$1.29 \quad a_n = \frac{v^4 t^2}{16\pi^2 R^3 N^2} = 0,01 \text{ м/с}^2.$$

$$1.30 \quad \omega = \varepsilon t = 3,14 \text{ с}^{-1}, \\ v = 0,314 \text{ м/с}, \\ a_n = \omega^2 R = 0,99 \text{ м/с}^2, \\ a_\tau = \varepsilon R = 0,314 \text{ м/с}^2, \\ a = a_\tau \sqrt{1 + \varepsilon^2 t^4} = 1,03 \text{ м/с}^2,$$

$$\varphi = \arcsin \frac{v_y}{v} = 56^\circ; \quad y = \frac{g}{2v_0^2} x^2.$$

$$1.19 \quad a_n = \frac{g v_0}{\sqrt{v_0^2 + g^2 t^2}} = 1,64 \text{ м/с}^2,$$

$$a_\tau = \frac{g^2 t}{\sqrt{v_0^2 + g^2 t^2}} = 9,67 \text{ м/с}^2.$$

$$1.20 \quad R = \frac{(v_0^2 + g^2 t^2)^{3/2}}{g v_0} = 108,7 \text{ м.}$$

$$1.21 \quad s = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g} = 31177 \text{ м},$$

$$h = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} = 4500 \text{ м},$$

$$R = \frac{v_0^2 \cos^2 \alpha}{g} = 27 \text{ км.}$$

$$1.22 \quad v = 1670 \text{ км/год.}$$

$$1.23 \quad R = 8,3 \text{ см.}$$

$$1.24 \quad \varepsilon = \frac{\omega^2}{4\pi N} = 3,2 \text{ с}^{-2}.$$

$$1.25 \quad t = 2N / n_0 = 10 \text{ с.}$$

$$1.26 \quad \varepsilon = -0,21 \text{ с}^{-2}, \quad N = 60.$$

$$1.27 \quad t = \frac{\sqrt{a_n R}}{a_\tau}, \quad t_1 = 2 \text{ с}, \quad t_2 = 2,8 \text{ с.}$$

$$1.28 \quad a_\tau = 6 \text{ м/с}^2, \quad a_n = 4,5 \text{ м/с}^2, \\ a = 7,5 \text{ м/с}^2.$$

$$1.45 \quad W_\kappa = 32,2 \text{ Дж}, \quad W_n = 39,4 \text{ Дж.}$$

$$1.46 \quad \alpha = 60^\circ.$$

$$1.47 \quad s = 0,1 \text{ м}, \quad P_{cp} = 2,5 \cdot 10^5 \text{ Вт.}$$

$$1.48 \quad A = \frac{F_1}{2} (l_1 - l_0) = 1,2 \text{ Дж.}$$

$$1.49 \quad \Delta W_n = b x_0^3 / 3.$$

$$1.50 \quad \Delta x = 0,84 \text{ м.}$$

$$\sin \varphi = \frac{a_r}{a}, \quad \varphi = 17^\circ 46'.$$

$$1.31 \quad R = \frac{a}{\varepsilon \sqrt{1 + \varepsilon^2 t^4}} = 6,1 \text{ см.}$$

$$1.32 \quad F = 2,8 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

$$1.33 \quad v = 11,8 \text{ м/с.}$$

$$1.34 \quad a = \frac{F}{m_1 + m_2 + m_3} = 3,3 \text{ м/с}^2,$$

$$T_1 = \frac{F(m_3 + m_2)}{m_1 + m_2 + m_3} = 16,7 \text{ Н,}$$

$$T_2 = \frac{m_3 F}{m_1 + m_2 + m_3} = 10 \text{ Н.}$$

$$1.35 \quad a = 4,3 \text{ м/с}^2, \quad T = 1,5 \text{ Н.}$$

$$1.36 \quad a = 0,47 \text{ м/с}^2, \quad T = 10,3 \text{ Н.}$$

$$1.37 \quad a = \frac{F}{m} - \mu g = 3,02 \text{ м/с}^2.$$

$$1.38 \quad v = \sqrt{2\mu gl} = 12,1 \text{ м/с.}$$

$$1.39 \quad a = 1,7 \text{ м/с}^2, \quad T = 2,14 \text{ Н.}$$

$$1.40 \quad \Delta p = 40 \text{ кг} \cdot \text{м/с.}$$

$$1.41 \quad a = \frac{A}{mh} - g = 30 \text{ м/с}^2.$$

$$1.42 \quad A_1 = 21 \text{ Дж}, \quad A_2 = 9 \text{ Дж.}$$

$$1.43 \quad \Delta p = \frac{2\Delta W_{\kappa}}{v_2 - v_1} = 3,5 \text{ кг} \cdot \text{м/с.}$$

$$1.44 \quad \mu = \frac{v^2}{2gs} = 0,01.$$

$$1.63 \quad I = m(D_1^2 + D_2^2) / 8 = \\ = 6,25 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

$$1.64 \quad I = 5,6 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

$$1.65 \quad m = \frac{2F}{\varepsilon R} = 10 \text{ кг.}$$

$$1.66 \quad \varepsilon = 14,3 \text{ рад/с}^2, \quad t = 8,8 \text{ с.}$$

$$1.51 \quad F_x = \frac{2Ax}{(x^2 + y^2 + z^2)^2},$$

$$F_y = \frac{2Ay}{(x^2 + y^2 + z^2)^2},$$

$$F_z = \frac{2Az}{(x^2 + y^2 + z^2)^2}.$$

$$1.52 \quad \vec{F} = -(e^{-y} - ye^{-x})\vec{i} + \\ + (xe^{-y} - e^{-x})\vec{j}.$$

$$1.53 \quad v_1 = 0,2 \text{ м/с.}$$

$$1.54 \quad v = 0,18 \text{ м/с}, \quad W_{\kappa} = 1,8 \text{ Дж.}$$

$$1.55 \quad W_{op} = \frac{m}{M} W_{\kappa} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Дж.}$$

$$1.56 \quad s = 0,05 \text{ м.}$$

$$1.57 \quad Q = mv^2 / 4 = 3 \text{ Дж.}$$

$$1.58 \quad v = \frac{m+M}{m} \sqrt{gl} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} = 548 \text{ м/с.}$$

$$1.59 \quad l_{max} = \left(\frac{m}{m+M} \right)^2 \frac{v^2}{4g} = 0,63 \text{ м.}$$

$$1.60 \quad u_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1 = -3,3 \text{ см/с,}$$

$$u_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1 = 6,7 \text{ см/с.}$$

$$1.61 \quad \frac{W_{\kappa 0}}{W_{\kappa}} = 1,4.$$

$$1.62 \quad I = 9,3 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

$$1.80 \quad Q = 0,7m(v_1^2 - v_2^2) = \\ = 2,52 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$$

$$1.81 \quad a = \frac{g \sin \alpha}{1 + I/mR^2};$$

$a_1 = 1,13 \text{ м/с}^2$ – для суцільного,

$a_2 = 0,85 \text{ м/с}^2$ – для порожнього
того циліндра.

$$1.67 \quad M_{mp} = 90 \text{ Н.}$$

$$1.68 \quad \mu = \frac{\pi n m R}{F t} = 0,2.$$

$$1.69 \quad a = \frac{2m_2 g}{m_1 + 2m_2} = 0,63 \text{ м/с}^2.$$

$$1.70 \quad a = \frac{(m_2 - m_1)g}{m/2 + m_1 + m_2} = 0,32 \text{ м/с}^2,$$

$$T_1 = m_1(g + a) = 10,1 \text{ Н,}$$

$$T_2 = m_2(g - a) = 10,4 \text{ Н.}$$

$$1.71 \quad n_2 = \frac{m_0 + 2m}{m_0} n_1 = 6,6 \text{ об/хв.}$$

$$1.72 \quad A = 57,6 \text{ Дж.}$$

$$1.73 \quad \omega = 1,5 \text{ с}^{-1}.$$

$$1.74 \quad \omega_2 = 2,7 \text{ с}^{-1}, \quad \Delta W_k = 4,2 \text{ Дж.}$$

$$1.75 \quad \omega = 200 \text{ с}^{-1}, \quad a_{доу} = 8 \cdot 10^3 \text{ м/с}^2.$$

$$1.76 \quad W_k = 0,2 \text{ Дж.}$$

$$1.77 \quad W_k = F^2 t^2 / m = 2 \text{ кДж.}$$

$$1.78 \quad W_{об} = W_k / 3.$$

$$1.79 \quad W_k = 0,7 m v^2 = 2,8 \text{ Дж,}$$

$$s = \frac{0,7 v^2}{g \cdot \sin \alpha} = 0,57 \text{ м.}$$

$$1.82 \quad a = 1,3 \text{ м/с}^2, \quad v = 1,6 \text{ м/с,}$$

$$W_k = 1,96 \text{ Дж.}$$

$$1.83 \quad h_{кул} / h_{сф} = 1,07.$$

$$1.84 \quad t = 2l / \sqrt{gh} = 1,8 \text{ с.}$$

$$1.85 \quad v = \sqrt{3gl} = 3,83 \text{ м/с,}$$

$$W_k = 0,25 \text{ Дж.}$$

$$1.86 \quad \omega = 14,1 \text{ с}^{-1}, \quad v = 2,1 \text{ м/с.}$$

$$1.87 \quad v = 2,6 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

$$1.88 \quad \tau = 7,1 \tau_0.$$

$$1.89 \quad \Delta t = 3,2 \text{ с.}$$

$$1.90 \quad v = 2,985 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

$$1.91 \quad v/c = 0,999.$$

$$1.92 \quad v = 2,22 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

$$1.93 \quad A = 0,42 mc^2 = 0,215 \text{ МеВ,}$$

$$A_{кл} = 0,19 mc^2 = 0,097 \text{ МеВ.}$$

$$1.94 \quad \Delta m = 0,217 \text{ кг/кмоль.}$$

$$1.95 \quad \Delta t = 7,2 \cdot 10^{12} \text{ років.}$$

1.96 Використовувати релятивістський закон додавання швидкостей.

2 Коливання та хвилі

$$2.1 \quad l = gT^2 / 4\pi^2 = 0,25 \text{ м.}$$

$$2.2 \quad t_1 = \sqrt{2l/g}, \quad t_2 = \frac{\pi}{2} \sqrt{l/g},$$

$$t_1/t_2 = 0,89.$$

$$2.3 \quad \varepsilon = \Delta T/T = R/2l = 0,05$$

2.17 Якщо $x(t) = A \cos \omega t$, то

$$\frac{W_{\dot{\varepsilon}}}{W_n} = \left(\frac{\sin \omega t}{\cos \omega t} \right)^2 = \gamma. \text{ Тоді:}$$

1) $\gamma = 15$; 2) $\gamma = 3$; 3) $\gamma = 0$.

$$2.18 \quad A = 2 \text{ см, } \alpha = \pi/6,$$

$$2.4 \quad T_m / T_a = 0,64.$$

$$2.5 \quad I = \frac{mgl}{4\pi^2} T^2 = 98 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

$$2.6 \quad T = 2\pi \sqrt{2l/3g} = 0,63 \text{ с.}$$

$$2.7 \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{2l(m_1 + 3m_2)}{3g(m_1 + 2m_2)}} = 1,98 \text{ с.}$$

$$2.8 \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{6(r_1^2 + r_2^2)}{g(r_2 + r_1)}} = 2,46 \text{ с.}$$

$$2.9 \quad a = -\omega^2 x_0 \sin \omega t = -\omega^2 x.$$

$$2.10 \quad x(t) = A \cos(\pi t / 2 + \pi / 4), \\ x_1 = 35,5 \text{ мм}, \quad x_2 = -50 \text{ мм}.$$

$$2.11 \quad x(t) = A \cos(\nu_{\max} t / A + \pi / 3), \\ a_{\max} = \nu_{\max}^2 / A = 4 \times 10^3 \text{ м} / \text{с}^2.$$

$$2.12 \quad F_1 = 0,08 \text{ Н}, \\ W = m\omega^2 A^2 / 2 = 1,36 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}.$$

$$2.13 \quad F_{\max} = 2 \times 10^{-4} \text{ Н}, \\ W = 4,9 \times 10^{-6} \text{ Дж}.$$

$$2.14 \quad \nu_{\max} = 7,9 \text{ с}^{-1} / \text{ñ}, \\ F_{\max} = 1,2 \times 10^{-3} \text{ Н}, \\ a_1 = -0,12 \text{ м} / \text{с}^2.$$

$$2.15 \quad F_1 = 0,25 \text{ Н}, \quad \nu_2 = 0,16 \text{ с}^{-1} / \text{ñ}.$$

$$2.16 \quad A_{12} = \frac{1}{4} x_0 F_0 \cdot [2\omega(t_2 - t_1) + \\ + \sin 2\omega t_2 - \sin 2\omega t_1], \quad A = \pi x_0 F_0, \\ P = x_0 \omega F_0 / 2.$$

$$x(t) = 2 \cos(\pi t + \pi / 6) \text{ см}.$$

$$2.19 \quad \Delta\alpha = \pi / 2.$$

$$2.20 \quad y(x) = 1 - x^2 / 2.$$

$$2.21 \quad x^2 + y^2 = 4.$$

$$2.22 \quad A_0 / A_n = e^{n\chi} = 7,3.$$

$$2.23 \quad \chi = \ln(A_1 / A_2) / n = 0,3,$$

$$\beta = \frac{\chi}{T} = 0,06 \text{ с}^{-1},$$

$$x(t) = 0,2 e^{-0,06t} \sin\left(\frac{2\pi}{5} t\right).$$

$$2.24 \quad A_0 / A_2 = 8.$$

$$2.25 \quad \chi = 2\pi \sqrt{l/g} \ln 10 / t = 0,0068.$$

$$2.26 \quad t = \frac{\ln n}{2\chi\nu} = 14,4 \text{ с}, \quad \text{де } n = W_0 / W_n.$$

$$2.27 \quad \nu = l / \left(2\pi \sqrt{\frac{x_1 F}{g F_1}} \right) = 21 \text{ м} / \text{с}.$$

$$2.28 \quad \lambda_{\max} = \nu / \nu_{\min} = 16,5 \text{ м}, \\ \lambda_{\min} = \nu / \nu_{\max} = 2,2 \text{ см}.$$

$$2.29 \quad \nu = \lambda \nu = 350 \text{ м} / \text{с}, \\ \nu_{\max} = 0,785 \text{ м} / \text{с}.$$

$$2.30 \quad \xi_1 = 4 \text{ см}.$$

$$2.31 \quad \xi(x, t) = A \sin(\omega t - kx), \\ \xi_1 = 2,5 \text{ см}.$$

$$2.32 \quad \xi(x, t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T} t - \frac{2\pi}{\lambda} x\right), \\ \lambda = 0,48 \text{ м}.$$

$$2.33 \quad E = 1,9 \cdot 10^{11} \text{ Па}.$$

$$2.34 \quad j = 2\pi^2 A^2 \nu^2 \sqrt{\rho E} = 13,9 \text{ Вт} / \text{м}^2.$$

3 Молекулярна фізика і термодинаміка

$$3.1 \quad N = pV / kT = 5,03 \cdot 10^5, \\ \rho = \frac{M p}{RT} = 2,4 \cdot 10^{-14} \text{ кг} / \text{м}^3.$$

$$3.2 \quad N = mN_A / M, \quad N_1 = 3,01 \cdot 10^{23},$$

$$3.14 \quad d = \sqrt{\frac{kT}{\sqrt{2\pi} \lambda p}} = 2,68 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

$$3.15 \quad \bar{\lambda} = \frac{3\eta}{p} \sqrt{\frac{\pi RT}{8M}} = 9,9 \cdot 10^{-9} \text{ м}.$$

$$N_2 = 3,34 \cdot 10^{22}.$$

$$3.3 \quad N = pV / kT = 321.$$

$$3.4 \quad \Delta N = 4\pi N_A \left(\frac{M}{2\pi RT} \right)^{3/2} v^2 \times \\ \times \exp\left(-\frac{Mv^2}{2RT}\right) \Delta v,$$

$$a) \quad \Delta N = 1,76 \cdot 10^{16},$$

$$b) \quad \Delta N = 10^{17}.$$

$$3.5 \quad T = \frac{M(v_2^2 - v_1^2)}{4R \ln(v_2/v_1)} = 327 \text{ К.}$$

$$3.6 \quad \Delta N = 4\pi N_A \left(\frac{\rho V}{M} \right)^{3/2} v^2 \times \\ \times \exp\left(-\frac{Mv^2}{2RT}\right) \Delta v = 2,5 \cdot 10^{14}.$$

$$3.7 \quad T = Mv_{\text{кв}}^2 / 3R = 71 \text{ К.}$$

$$3.8 \quad p = \rho v_{\text{кв}}^2 / 3 = 5 \text{ кПа.}$$

$$3.9 \quad v_{\text{имоб}} = 344,5 \text{ м/с,} \\ v_{\text{cep}} = 388,9 \text{ м/с.}$$

$$3.10 \quad \bar{\tau} = \frac{1}{4\sigma^2 p} \sqrt{\frac{M kT}{\pi N_A}} = 8,7 \cdot 10^{-8} \text{ с.}$$

$$3.11 \quad \bar{Z} = 2d^2 \left(\frac{p_0}{kT_0} \right)^2 \sqrt{\frac{\pi RT_0}{M V}} = \\ = 7 \cdot 10^{28} \text{ с}^{-1}.$$

$$3.12 \quad \bar{Z} = \frac{4d^2 p}{k} \sqrt{\frac{\pi R}{M T}} = 2,3 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}.$$

$$3.13 \quad \bar{\lambda} = 50,2 \text{ м, } \bar{\tau} = 0,11 \text{ с.}$$

$$3.28 \quad A = (p_0 + \frac{mg}{S}) V_1 \frac{\Delta T}{T_1} = 17 \text{ Дж.}$$

$$3.29 \quad M = \frac{m R \Delta T}{Q} = 28 \text{ г/моль.}$$

$$3.30 \quad \Delta U = i v p \Delta V / 2 = 2,5 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

$$3.16 \quad D = \frac{2\chi V}{3kN} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с.}$$

$$3.17 \quad \chi = \frac{i\eta R}{2M} = 0,09 \text{ м}^2 / (\text{с} \cdot \text{м}).$$

$$3.18 \quad \frac{\eta_1}{\eta_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} = 1,12.$$

$$3.19 \quad h = \frac{RT \ln 0,99}{M g} = 79,5 \text{ м.}$$

$$3.20 \quad h = \frac{RT}{Mg} \ln \frac{p_0}{p} = 5564 \text{ м.}$$

$$3.21 \quad h = \frac{p_0}{\rho g} = 8200 \text{ м.}$$

$$3.22 \quad U = \frac{i mRT}{2M} = 1,9 \text{ кДж.}$$

$$3.23 \quad U = \frac{i pV}{2} = 625 \text{ Дж.}$$

$$3.24 \quad U = \frac{i p m}{2\rho} = 60 \text{ кДж.}$$

$$3.25 \quad p = \frac{\pi N k M v_{\text{cp}}^2}{8RV} = 7,5 \cdot 10^4 \text{ Па,} \\ W_{\text{ep}} = pV = 750 \text{ Дж.}$$

$$3.26 \quad \Delta U = \frac{i p \Delta V}{2} = 2,5 \cdot 10^5 \text{ Дж,} \\ A = p \Delta V = 10^5 \text{ Дж,} \\ Q = 3,5 \times 10^5 \text{ Дж.}$$

$$3.27 \quad Q = \left(\frac{i}{2} + 1 \right) \left(p_1 V_2 - \frac{mRT_1}{M} \right) = 7,8 \text{ кДж.}$$

$$3.44 \quad \Delta m = \frac{M p_1 V}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) = 1,5 \text{ г.}$$

$$3.45 \quad \eta_{\text{ид}} = 27 \%, \\ Q_1 = 274 \text{ кДж, } Q_2 = 200 \text{ кДж.}$$

$$3.46 \quad \eta_{\text{ид}} = 20 \%, \quad A = 1,26 \text{ Дж.}$$

$$3.47 \quad A = 1,9 \text{ кДж, } Q_2 = 3,7 \text{ кДж.}$$

$$A = \nu R \Delta T = 0,83 \cdot 10^6 \text{ Äæ},$$

$$Q = 3,32 \cdot 10^6 \text{ Äæ}.$$

$$3.31 \Delta T = AT_1 / (p_1 V_1) = 58 \text{ K}.$$

$$3.32 \frac{p_1}{p_2} = 1,07.$$

$$3.33 Q = \frac{m}{M} RT_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = -383 \text{ Äæ}.$$

$$3.34 A = \frac{m}{M} RT_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = 714 \text{ Äæ}.$$

$$3.35 T_2 = T_1 (V_1 / V_2)^{\gamma-1} = 207 \text{ K}.$$

$$3.36 T_2 = T_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = 847 \text{ K}.$$

$$3.37 T_{1am} / T_{2am} = 1,18.$$

$$3.38 p_1 = p_2 (V_2 / V_1)^{\gamma} = 82 \text{ кПа}.$$

$$3.39 p_3 = p_2 (p_2 / p_1)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = 3,9 \text{ кПа}.$$

$$3.40 T_1 / T_2 = (V_2 / V_1)^{\gamma-1} = 1,32,$$

$$A = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) = 1,21 \hat{\text{E}} \text{ Äæ}$$

3.41

$$\Delta U = \frac{i}{2} p_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right] = 3,325 \text{ Äæ} \quad 3.42$$

$$T_2 = T_1 (V_1 / V_2)^{\gamma-1} = 754 \text{ K},$$

$$\dot{A} = \frac{im}{2M} RT_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) = 673 \text{ Äæ}.$$

$$3.43 Q = \frac{i}{2} (n-1) p_1 V = 10^4 \text{ Дж}.$$

$$3.48 \eta = 18 \%.$$

$$3.49 \eta_{id} = 38 \%, \eta = 20 \%.$$

$$3.50 \Delta S = \frac{m}{M} C_p \ln \frac{T_2}{T_1} = 105 \text{ Äæ / K}.$$

$$3.51 \Delta S = \frac{m}{M} C_v \ln \frac{T_2}{T_1} = 1,75 \frac{\text{Äæ}}{\hat{\text{E}}}.$$

$$3.52 \Delta S = N k \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

$$3.53 \Delta S = \frac{m}{M} C_p \ln \frac{V_2}{V_1} = 66,3 \frac{\text{Äæ}}{\hat{\text{E}}}.$$

$$3.54 \Delta S = \frac{m}{M} R \ln \frac{p_1}{p_2} = 17,3 \frac{\text{Äæ}}{\hat{\text{E}}}.$$

$$3.55 \Delta S = m \left(c_{\hat{\text{E}}} \ln \frac{T_2}{T_1} + \frac{\lambda}{T_2} + c_{\hat{\text{a}}} \ln \frac{T_3}{T_2} + \frac{r}{T_3} \right) = 88 \frac{\text{Äæ}}{\hat{\text{E}}}.$$

$$3.56 T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = 364 \hat{\text{E}},$$

$$\Delta S = 0, V_2 = \frac{RT_1}{p_1} \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{\gamma}} = 1,52 \cdot 10^{-2} \hat{\text{E}}^3.$$

$$3.57 \Delta S = \left(i \ln \frac{p_2}{p_1} + (i+2) \ln \frac{V_2}{V_1} \right) \times$$

$$\times \frac{mR}{2M} = 1,41 \frac{\text{Äæ}}{\hat{\text{E}}}.$$

4 Електростатика

4.1 Від першого заряду на відстані

$$x = \frac{l(\sqrt{q_1 q_2} - q_1)}{q_2 - q_1} = 1,24 \text{ см}.$$

$$4.11 F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = 100 \text{ Н},$$

$$4.2 \quad F = k_0 q^2 \sqrt{\frac{1}{a^4} + \frac{1}{b^4}} = 1,15 \cdot 10^{-5} \text{ Н.}$$

$$4.3 \quad E_1 = E_3 = 0,$$

$$E_2 = \frac{\sqrt{2}q}{\pi \epsilon_0 a^2} = 5 \cdot 10^4 \text{ Н/Кл.}$$

$$4.4 \quad \frac{c}{v} = \frac{2c \sqrt{\pi \epsilon_0 r m}}{e} = 137,$$

$$n = \frac{v}{2\pi r} = 6,5 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}.$$

$$4.5 \quad E_B = \frac{3e}{16\pi \epsilon_0 r^2} =$$

$$= 3,86 \cdot 10^{11} \text{ В/м,}$$

$$E_C = \sqrt{3/2} \frac{e}{8\pi \epsilon_0 r^2} = 3,14 \cdot 10^{11} \text{ В/м.}$$

4.6 Кульки зіткнуться, заряд другої з них порівну розподілиться між кульками, після чого вони знову розійдуться на відстань $r_1 = r/\sqrt[3]{4} = 3,13 \text{ см.}$

$$4.7 \quad \sigma = \frac{2\epsilon_0 m g \cdot \operatorname{tg} \alpha}{q} = 5,1 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}^2.$$

$$4.8 \quad E = \frac{R_1 R_2 U}{(R_2 - R_1) r^2} = 1,3 \cdot 10^5 \text{ В/м.}$$

$$4.9 \quad N = \frac{mgd}{eU} = 4000.$$

$$4.10 \quad F = \frac{qq'}{2\pi \epsilon_0 l r} = 9,6 \cdot 10^{-11} \text{ Н.}$$

$$U_2 = \frac{UC_1}{C_1 + C_2} = 20 \text{ В.}$$

$$4.25 \quad C = \frac{4\pi \epsilon_0 \epsilon R_1 R_2}{R_2 - R_1} = 470 \text{ пФ,}$$

$$R = \frac{C}{4\pi \epsilon_0 \epsilon} = 2,1 \text{ м.}$$

$$A = \frac{e^2}{4\pi \epsilon_0 r} = 1,5 \cdot 10^{-13} \text{ Дж.}$$

$$4.12 \quad U = Ed = 400 \text{ В.}$$

$$4.13 \quad v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}, \quad v_1 = 0,6 \cdot 10^6 \text{ м/с,}$$

$$v_2 = 1,9 \cdot 10^6 \text{ м/с, } v_3 = 19 \cdot 10^6 \text{ м/с.}$$

$$4.14 \quad v = \sqrt{\frac{2esU}{md}} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ м/с.}$$

$$4.15 \quad A = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon_0} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) = 2,25 \cdot 10^{-7} \text{ Дж}$$

$$4.16 \quad v = \frac{e}{\sqrt{2\pi \epsilon_0 m r}} = 3,1 \cdot 10^6 \text{ м/с.}$$

$$4.17 \quad \varphi = \frac{Nq}{4\pi \epsilon_0 r \sqrt[3]{N}}.$$

$$4.18 \quad m_{\text{эл}} = 4\pi \epsilon_0 R m \varphi / e = 5 \cdot 10^{-20} \text{ кг.}$$

$$4.19 \quad R = \frac{\varphi}{E_{\text{max}}} = 0,167 \text{ м,}$$

$$q = 4\pi \epsilon_0 R \varphi = 9,3 \cdot 10^{-6} \text{ Кл.}$$

$$4.20 \quad A = \frac{q_1 \sigma R^2}{\epsilon_0 r} = 6,5 \cdot 10^{-5} \text{ Дж.}$$

$$4.21 \quad A = \frac{q_1 \varphi_R R}{r_1} = 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ Дж.}$$

$$4.22 \quad r_{\text{min}} = \frac{e^2}{2\pi \epsilon_0 m v^2} = 5 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

$$4.23 \quad q_1 = q_2 = C_1 U_1 = 8 \cdot 10^{-5} \text{ Кл,}$$

$$U_1 = \frac{UC_2}{C_1 + C_2} = 40 \text{ В,}$$

$$4.24 \quad R = \frac{C}{4\pi \epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ м.}$$

$$4.34 \quad \Delta W = W_1 - W_2 =$$

$$= \frac{C_1 C_2 U^2}{2(C_1 + C_2)} = 3,3 \cdot 10^{-6} \text{ Дж.}$$

$$4.26 \quad \frac{C}{l} = \frac{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon}{\ln \frac{R_2}{R_1}} = 2,14 \cdot 10^{-4} \text{ мкФ/м.}$$

$$4.27 \quad S = Cd / \varepsilon_0 = 11,3 \text{ м}^2.$$

$$4.28 \quad d = \varepsilon_0 SU / q = 4,8 \text{ мм.}$$

$$4.29 \quad W_1 = \frac{\varepsilon_0 SU^2}{2d_1} = 4,4 \cdot 10^{-7} \text{ Дж,}$$

$$W_2 = \frac{\varepsilon_0 SU^2}{2d_2} = 8,8 \cdot 10^{-8} \text{ Дж.}$$

$$4.30 \quad W_1 = 4,4 \cdot 10^{-7} \text{ Дж,}$$

$$W_2 = W_1 \frac{d_2}{d_1} = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ Дж.}$$

$$4.31 \quad 1) U = (U_1 + U_2) / 2 = 150 \text{ В,}$$

$$2) U = (U_2 - U_1) / 2 = 50 \text{ В.}$$

$$4.32 \quad q_1 = q_2' (R_1 + R_2) / R_2 =$$

$$= 7 \cdot 10^{-8} \text{ Кл, } \sigma_1' = \frac{q_1 - q_2'}{4\pi R_1^2} =$$

$$= 4 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}^2, \quad \sigma_2' = \frac{q_2'}{4\pi R_2^2} =$$

$$= 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}^2.$$

4.33 Знайти відношення заряду кулі q_1' до заряду земної кулі q_2' після з'єднання кулі із

$$\text{Землею. } q_1' = \frac{q_1 R_1}{R_1 + R_2} \rightarrow 0,$$

$$q_2' = \frac{q_1 R_2}{R_1 + R_2} \rightarrow q_1,$$

$$\frac{q_1'}{q_2'} = \frac{R_1}{R_2} = 1,6 \cdot 10^{-7}.$$

$$4.35 \quad w = \frac{\tau^2}{8\pi^2 \varepsilon_0 r^2} = 0,1 \text{ Дж/м}^3.$$

$$4.36 \quad w = \frac{q^2}{32\pi^2 \varepsilon \varepsilon_0 r^4},$$

$$w_1 = 0, \quad w_2 = 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/м}^3.$$

$$4.37 \quad \Delta q = \frac{CU}{2} \cdot \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} = 3,3 \cdot 10^{-8} \text{ Кл.}$$

$$4.38 \quad E_1 = \frac{U}{\varepsilon d - (\varepsilon - 1)d_1} =$$

$$= 6,67 \cdot 10^3 \text{ В/м,}$$

$$E_2 = \frac{\varepsilon U}{\varepsilon d - (\varepsilon - 1)d_1} = 4 \cdot 10^4 \text{ В/м.}$$

$$4.39 \quad \varepsilon = (r_0 / r)^2 = 2,2.$$

$$4.40 \quad \sigma' = \varepsilon_0 (\varepsilon - 1) U / d =$$

$$= 8,85 \cdot 10^{-5} \text{ Кл/м}^2.$$

$$4.41 \quad E = U / d = 3 \cdot 10^5 \text{ В/м,}$$

$$\sigma = \varepsilon_0 \varepsilon U / d = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ Кл/м}^2,$$

$$\sigma' = \varepsilon_0 (\varepsilon - 1) U / d = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ Кл/м}^2.$$

$$4.42 \quad F = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon SU^2}{2d^2} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ Н.}$$

$$4.43 \quad r = r_1 / \sqrt{\varepsilon} = 20,7 \text{ см.}$$

$$4.44 \quad q = mg \frac{\rho_{\hat{e}} - \rho_p}{\rho_{\hat{e}} E} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл.}$$

5 Постійний електричний струм

$$5.1 \quad I = \varepsilon / (R + r) = 1,2 \text{ А,}$$

$$5.13 \quad \eta = U / \varepsilon = 0,91,$$

$$U_R = IR = 10,8 \text{ В},$$

$$U_r = Ir = 1,2 \text{ В}.$$

5.2 $U_r = \varepsilon - IR = 2,7 \text{ В},$
 $r = U_r / I = 0,9 \text{ Ом}.$

5.3 $I_{max} = I\varepsilon / (\varepsilon - IR) = 5,5 \text{ А}.$

5.4 $R_1 = 10 \text{ Ом}, R_2 = 30 \text{ Ом}.$

5.5 $r = \frac{P_2 I_1 - P_1 I_2}{I_1 I_2 (I_1 - I_2)} = 2 \text{ Ом},$
 $\varepsilon = P_1 / I_1 + I_1 r = 12 \text{ В}.$

5.6 Потужність, що виділяється на зовнішній ділянці ланцюга опору R , становить $P(R) = I^2 R$, де $I = \varepsilon / (R + r)$. Диференціюючи $P(R)$ по R і прирівнюючи одержаний вираз до нуля, маємо $R_m = r$, тобто опір навантаження повинен дорівнювати внутрішньому опору джерела струму.

5.7 $P_{max} = \varepsilon^2 / 4r. P_1 = 360 \text{ Вт},$
 $P_2 = 36 \text{ Вт}.$

5.8 $I_{1,2} = \frac{\varepsilon \pm \sqrt{\varepsilon^2 - 4rP/n}}{2r},$
 $I_1 = 2,67 \text{ А}, I_2 = 2 \text{ А},$
 $P_{max} = n\varepsilon^2 / 4r = 8,2 \text{ Вт}.$

5.9 $P_{max} = I_{max}\varepsilon / 4 = 12,5 \text{ Вт}.$

5.10 $Q_{max} = \varepsilon I_{max} t / 2 = 540 \text{ Дж}.$

5.11 $I = \varepsilon / (R + r) = 80 \text{ А},$
 $P = I^2 R = 640 \text{ Вт}.$

5.12 $P_1' = \frac{P_1 P_2^2}{(P_1 + P_2)^2} = 14,4 \text{ Вт},$
 $P_2' = \frac{P_1^2 P_2}{(P_1 + P_2)^2} = 9,6 \text{ Вт}.$

$$I = \varepsilon / (R + r) = 1,09 \text{ А},$$

$$U_R = IR = 10,9 \text{ В}.$$

5.14 $\eta = (\varepsilon - Ir) / \varepsilon = 0,25.$

5.15 $r = \sqrt{R_1 R_2} = 1 \text{ Ом}, \eta = \frac{R}{R + r},$
 $\eta_1 = 0,17, \eta_2 = 0,83.$

5.16 $r = \sqrt{R_1 R_2} = 1 \text{ Ом},$
 $\varepsilon = (R_1 + r) \sqrt{P / R_1} = 3,4 \text{ В}.$

5.17 1) $Q_{1,2}^{noc} = U^2 R_{1,2} t / (R_1 + R_2)^2,$
 $Q_1 = 3,8 \text{ Дж}, Q_2 = 6,3 \text{ Дж},$
 2) $Q_{1,2}^{nap} = U^2 t / R_{1,2},$
 $Q_1 = 27 \text{ Дж}, Q_2 = 16,2 \text{ Дж}.$

5.18 $q = \sqrt{3Q\tau / R} / 2 = 20 \text{ Кл}.$

5.19 $q = \tau(U_1 + U_2) / 2R = 6 \text{ Кл}.$

5.20 $q_1 = I_1 t / 2 = 15 \text{ Кл},$
 $q_2 = I_2 \Delta t / \ln 2 = 0,26 \text{ Кл}.$

5.21 $Q = I^2 R \tau / 3 = 10^3 \text{ Дж}.$

5.22 $I = \frac{e^2}{2\pi R \sqrt{4\pi\varepsilon_0 m_e R}} = 1 \text{ МА}.$

5.23 $I = N_A e \bar{u} DS / M = 2,7 \text{ А}.$

5.24 $\bar{u} = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}.$

5.25 $F = 2,4 \cdot 10^{-21} \text{ Н}.$

5.26 $\rho = U / (jl) = 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}.$

5.27 $w = U^2 / \rho l^2 = 4 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^3.$

5.28 $j = U / \rho l = 6,9 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$

5.29 $P = Im_e l / e = 5,7 \cdot 10^{-9} \text{ кг}\cdot\text{м/с}.$

5.30 $Q = \frac{I^2 \rho t}{2\pi d} \ln \frac{R}{r} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}.$

6 Електромагнетизм

$$6.1 \quad B = \frac{\mu_0 I l}{2\pi R \sqrt{l^2 + 4R^2}} = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ Тл.}$$

$$6.2 \quad H = \frac{2I}{\pi \sqrt{a^2 + b^2}} \left(\frac{b}{a} + \frac{a}{b} \right) = 27 \text{ А/м.}$$

$$6.3 \quad H = \frac{I}{2\pi a} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{4} = 383 \text{ А/м.}$$

$$6.4 \quad H = \frac{IR^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}},$$

$$H_0 = 63,6 \text{ А/м, } H_x = 25,8 \text{ А/м.}$$

$$6.5 \quad B = \frac{\mu_0 e^2}{4\pi R^2 \sqrt{4\pi \epsilon_0 R m}} = 12,4 \text{ Тл.}$$

$$6.6 \quad 1) \quad H_1 = \frac{IR^2}{(R^2 + l^2/4)^{3/2}},$$

$$H_1 = 12,2 \text{ А/м;}$$

$$2) \quad H_2 = 0.$$

$$6.7 \quad R = \frac{I(1 + \pi)}{2\pi H} = 8 \text{ см.}$$

$$6.8 \quad H = NI/l = 6,7 \cdot 10^3 \text{ А/м.}$$

$$6.9 \quad H = I/d = 1,25 \cdot 10^3 \text{ А/м.}$$

$$6.10 \quad B = \frac{2\mu_0 NI}{\pi(d_1 + d_2)} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ Тл,}$$

$$\Phi = \pi B (d_2 - d_1)^2 / 16 =$$

$$= 3,14 \cdot 10^{-6} \text{ Вб.}$$

6.11 Застосувати теорему про циркуляцію вектора напруженості магнітного поля. Розглянути колові контури, концентричні з віссю труби. Один з контурів радіусом меншим радіуса труби, а другий контур – більшого радіуса.

$$6.25 \quad v = E/B = 3 \cdot 10^3 \text{ м/с.}$$

$$6.12 \quad H_1 = \frac{I}{2\pi r_1} = 265, \quad H_2 = 0.$$

$$6.13 \quad F_A = IB = 0,21 \text{ Н.}$$

$$6.14 \quad F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I^2 l}{d} = 120 \text{ Н.}$$

$$6.15 \quad \frac{A}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi} \ln \frac{d_2}{d_1} = 2,8 \cdot 10^{-7}$$

Дж/м.

$$6.16 \quad \Phi = \mu_0 H a^2 \sin \theta = 2,5 \cdot 10^{-7} \text{ Вб.}$$

$$6.17 \quad \Phi = \frac{\mu_0 NI}{4\pi} (d_1 - d_2) \ln \frac{d_1}{d_2} =$$

$$= 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ Вб.}$$

$$6.18 \quad \Phi = \frac{\mu_0 a I}{2\pi} \ln \frac{a+b}{b} = 1,25 \cdot 10^{-7}$$

Вб.

$$6.19 \quad A = IBa^2 = 0,01 \text{ Дж.}$$

$$6.20 \quad A = IB\pi r^2 = 6,3 \cdot 10^{-5} \text{ Дж.}$$

$$6.21 \quad F = qvB = 3,2 \cdot 10^{-12} \text{ Н,}$$

$$R = \frac{mv}{qB} = 2,1 \text{ мм,}$$

$$T = 2\pi R/v = 1,3 \cdot 10^{-8} \text{ с.}$$

$$6.22 \quad R = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{e}} = 5,3 \cdot 10^{-4} \text{ м,}$$

$$n = \frac{Be}{2\pi m} = 5,6 \cdot 10^{10} \text{ об/с.}$$

$$6.23 \quad R = \frac{\sqrt{2m_p W}}{q_p B} = 0,32 \text{ м,}$$

де m_p і q_p – відповідно маса і заряд протона.

$$6.24 \quad F = \frac{\mu_0 I e}{2\pi d} \sqrt{\frac{2eU}{m}} = 4,1 \cdot 10^{-16} \text{ Н.}$$

$$6.41 \quad \epsilon_c = I_0 \omega L \cos \omega t =$$

$$6.26 \quad \varepsilon_{\text{сеп}} = \frac{2\pi BR^2}{\Delta t} = 1,57 \cdot 10^{-4} \text{ В.}$$

$$6.27 \quad \Phi = \Phi_0 \sin \omega t,$$

$$\Phi_0 = B_0 S = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ Вб,}$$

$$\varepsilon = -\varepsilon_0 \cos \omega t,$$

$$\varepsilon_0 = \Phi_0 \omega = 7,85 \cdot 10^{-3} \text{ В,}$$

$$I = -I_0 \cdot \cos \omega t,$$

$$I_0 = \frac{\pi d^2 B_0 \sqrt{S}}{4\rho} = 7,25 \text{ А.}$$

$$6.28 \quad \varepsilon_0 = 2\pi NBS \quad n = 282,6 \text{ В.}$$

$$6.29 \quad B = \frac{\varepsilon_{\text{сеп}} t}{NS} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ Тл.}$$

$$6.30 \quad \varepsilon = Blv = 0,13 \text{ В.}$$

$$6.31 \quad \varepsilon = B\omega l^2 / 2 = 5 \text{ В.}$$

$$6.32 \quad \Delta\varphi = \frac{\pi \mu_0 H_e n l^2}{3} = 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ В.}$$

$$6.33 \quad \varepsilon = \frac{\mu_0 N S I}{l \Delta t} = 0,018 \text{ В.}$$

$$6.34 \quad q = \frac{\pi r^2 B \cdot \sin \beta}{R} = 10^{-3} \text{ Кл.}$$

$$6.35 \quad Q = \frac{16\tau^3}{3R} = 66,7 \text{ Дж.}$$

$$6.36 \quad L = \mu_0 \mu N^2 S / l; \quad L_0 = 9 \cdot 10^{-4} \text{ Гн,} \\ L = 0,36 \text{ Гн.}$$

$$6.37 \quad S = \frac{Ld^2}{\mu_0 l} = 0,014 \text{ м}^2.$$

$$6.38 \quad N = \frac{4Ld}{\mu_0 \pi d^2} = 317.$$

$$6.39 \quad L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{R}{r} = 4,6 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.}$$

$$6.40 \quad \Delta t = LI / \varepsilon_c = 91,2 \text{ с.}$$

$$= 32,97 \cdot \cos 314 t,$$

$$W_m = \frac{LI_0^2}{2} \sin^2 \omega t =$$

$$= 0,26 \cdot \sin^2 314 t.$$

$$6.42 \quad \Delta t = \frac{L}{2R} = 0,01 \text{ с.}$$

$$6.43 \quad W = \frac{B^2 V}{2\mu_0 \mu} = 0,57 \text{ Дж.}$$

$$6.44 \quad t = (L/R) \ln 2 = 0,01 \text{ с.}$$

$$6.45 \quad I_0 / I = e^{\frac{R}{L} t} = 1,5.$$

6.46 Поле не потенціальне,

оскільки $\text{rot } \vec{E} = 2a\vec{k}$, а

$\text{div } \vec{E} = 0$. Циркуляція

$$C = \oint_L (\vec{E} d\vec{l}) = 2\pi aR^2.$$

$$6.47 \quad j_{\text{см}} = \varepsilon_0 \varepsilon \omega U_0 \cos \omega t / d.$$

$$H = \frac{j_{\text{см}} r}{2} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \omega U_0 r}{2d} \cos \omega t,$$

де

r – відстань від осі диска до точки, в якій визначається поле.

$$6.48 \quad W_{mE} / W_{mH} = 8 / (\varepsilon_0 \mu_0 \omega^2 R^2) = \\ = 2 \cdot 10^{14}.$$

$$6.49 \quad W_{mE} / W_{mH} = \varepsilon_0 \mu_0 \omega^2 R^2 / 8 = \\ = 5 \cdot 10^{-15}.$$

$$6.50 \quad \vec{j} = 2a\vec{k},$$

$$C = \oint_L (\vec{H} d\vec{l}) = 2\pi aR^2.$$

$$6.51 \quad \rho(x, y, z) = \varepsilon_0 (1 + 4y + 9z^2).$$

$$6.52 \quad \vec{S}_{\text{ср}} = \frac{\varepsilon_0 c^2 E_0^2}{2\omega} \vec{k}.$$

7 Хвильова оптика

$$7.1 \quad D = \frac{l \Delta x}{\lambda} = 0,91 \text{ м.}$$

$$7.2 \quad \frac{\Delta x_1}{\Delta x_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 1,3.$$

$$7.3 \quad x_k = \frac{\kappa \lambda D}{l}, \quad x_1 = 1,8 \text{ мм}, \\ x_2 = 3,6 \text{ мм}, \quad x_3 = 5,4 \text{ мм.}$$

$$7.4 \quad N = \frac{d(n-1)}{\lambda} = 8.$$

$$7.5 \quad d = \frac{N\lambda}{n-1} = 3,7 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

$$7.6 \quad \lambda = \frac{2r\varphi \Delta x}{L+r} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

$$7.7 \quad \varphi = \frac{\lambda(r+L)m}{2r \Delta x} = 10^{-3} \text{ рад.}$$

$$7.8 \quad d = \frac{\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} = 0,134 \text{ мкм.}$$

$$7.9 \quad \varphi = \frac{\lambda}{2n\Delta x} = 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ рад.}$$

$$7.10 \quad N = \frac{2nl\theta}{\lambda} = 5.$$

$$7.11 \quad r_4 = 2 \text{ мм}, \quad r_9 = 3 \text{ мм.}$$

$$7.12 \quad \lambda = \frac{r_m^2}{(m+0,5)R} = 5,9 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

$$7.13 \quad \frac{r_m}{r_{m6}} = \sqrt{n} = 1,15.$$

$$7.14 \quad l = D^2 / \lambda = 1,67 \text{ м.}$$

$$7.15 \quad m = \frac{d^2}{4R\lambda} = 5.$$

$$7.16 \quad r_1 = 0,71 \text{ мм}, \quad r_2 = 1 \text{ мм}, \\ r_3 = 1,22 \text{ мм}, \quad r_4 = 1,41 \text{ мм}, \\ r_5 = 1,58 \text{ мм.}$$

$$7.17 \quad \varphi = \arcsin \frac{m\lambda}{a} = 36^\circ 54'.$$

$$7.18 \quad d = \frac{m\lambda}{\sin \varphi} = 1,67 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

$$7.19 \quad d = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

$$7.20 \quad D = \frac{m}{\sqrt{d^2 - m\lambda^2}} = \\ = 4,5 \cdot 10^5 \text{ рад/м.}$$

$$7.21 \quad d = \sqrt{\lambda^2 + \frac{l}{D^2}} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

$$7.22 \quad \lambda = \sqrt{\frac{d^2}{m^2} - \frac{l}{D^2}} = 0,51 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

$$7.23 \quad \Delta\lambda = \frac{\lambda d}{ml} = 2,4 \cdot 10^{-11} \text{ м.}$$

$$7.24 \quad d = \frac{ml(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_1} = 25,4 \text{ мкм.}$$

$$7.25 \quad l = \frac{\lambda_1}{m(\lambda_2 - \lambda_1)} = 2,7 \text{ мм.}$$

$$7.26 \quad n = 1,73.$$

$$7.27 \quad \alpha_B = \arctg 1,13 = 48^\circ 40'.$$

$$7.28 \quad \alpha_B = 54^\circ 44'.$$

$$7.29 \quad \cos \alpha = \sqrt{2I/I_0}, \quad \alpha = 45^\circ.$$

$$7.30 \quad \alpha = 45^\circ.$$

$$7.31 \quad d = \varphi / \alpha = 6,06 \text{ мм.}$$

$$7.32 \quad \Delta l = d(n_o - n_e) = 5,1 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

8 Теплове випромінювання. Квантова природа світла

8.1 $T = \sqrt[4]{\frac{P}{\sigma S}} = 10^3 \text{ К.}$

8.2 $\lambda_m = b \cdot \sqrt[4]{\frac{\sigma}{R_T}} = 3,4 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$

8.3 $m = 4\pi \frac{\sigma}{c^2} (b / \lambda_m)^4 r_c^2 =$
 $= 4,7 \cdot 10^9 \text{ кг,}$
 $t = 0,01 \cdot m_c / m = 1,3 \cdot 10^{11} \text{ років.}$

8.4 $T_2 = 1750 \text{ К.}$

8.5 $W = \sigma (b / \lambda_m)^4 S = 7350 \text{ Дж.}$

8.6 $T_2 = 5800 \text{ К,}$
 $P_2 / P_1 = (\lambda_{m1} / \lambda_{m2})^4 = 3,62 .$

8.7 $T_1 = 2416 \text{ К, } T_2 = 4833 \text{ К.}$

8.8 $P = 4\pi r^2 \sigma (T_1^4 - T_2^4) = 0,9 \text{ Вт.}$

8.9 $W_2 / W_1 = 1,06 .$

8.10 $\varepsilon_1 = 2,07 \text{ еВ, } \varepsilon_2 = 1,24 \cdot 10^4 \text{ еВ.}$

8.11 $\varepsilon = 7,7 \cdot 10^4 \text{ еВ,}$
 $p = 4,1 \cdot 10^{-23} \text{ кг}\cdot\text{м/с.}$

8.12 $\nu = 9,3 \cdot 10^5 \text{ м/с.}$

8.13 $\nu = 1,45 \cdot 10^3 \text{ м/с.}$

8.14 $\lambda = 2,48 \cdot 10^{-11} \text{ м,}$
 $p = 2,67 \cdot 10^{-23} \text{ кг}\cdot\text{м/с.}$

8.15 $N = 1,2 \cdot 10^{21} .$

8.16 $\varepsilon_{min} = A = 4,51 \text{ еВ,}$
 $\nu_{max} = 9 \cdot 10^5 \text{ м/с.}$

8.17 $\lambda_{m1} = 2,3 \cdot 10^{-7} \text{ м,}$
 $\lambda_{m2} = 6,53 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$

8.18 $\nu_m = 6,5 \cdot 10^5 \text{ м/с.}$

8.19 $\nu = 1,32 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}, A = 2,48 \text{ еВ.}$

8.20 $U_3 = 5,2 \text{ В.}$

8.21 $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с.}$

8.22 $p_{max} = 3,41 \cdot 10^{-25} \text{ кг}\cdot\text{м/с.}$

8.23 $\lambda_{min} = 25 \text{ пм.}$

8.24 $U = 775 \text{ кВ.}$

8.25 $\lambda_{min} = 10^{-10} \text{ м.}$

8.26 $h = 6,59 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с.}$

8.27 $\lambda_0 = 24,2 \text{ пм.}$

8.28 $\Delta\lambda = 2,4 \cdot 10^{-12} \text{ м,}$
 $W_e = \frac{hc \cdot \Delta\lambda}{\lambda_0 (\lambda_0 + \Delta\lambda)} = 6,6 \cdot 10^3 \text{ еВ,}$
 $p_e = 4,4 \cdot 10^{-23} \text{ кг}\cdot\text{м/с.}$

8.29 $\varepsilon = 2,6 \cdot 10^5 \text{ еВ,}$
 $p = 1,37 \cdot 10^{-22} \text{ кг}\cdot\text{м/с.}$

8.30 $W_e = 0,1 \text{ МеВ.}$

8.31 $p_1 = 7 \cdot 10^{-7} \text{ Па,}$
 $p_2 = 3,5 \cdot 10^{-7} \text{ Па.}$

8.32 $N = \frac{\lambda p}{h(1 + \rho)} = 2,96 \cdot 10^{21} .$

8.33 $p_1 = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ Па,}$
 $p_2 = 9 \cdot 10^{-6} \text{ Па.}$

9 Атомна і ядерна фізика

$$9.1 \quad r_n = \frac{\varepsilon_0 h^2 n^2}{\pi Z e^2 m}, \quad v_n = \frac{Z e^2}{2 \varepsilon_0 h n},$$

$$W_n = \frac{Z^2 e^4 m}{8 \varepsilon_0^2 h^2 n^2}, \quad \frac{W_{nom}}{W_\kappa} = 2,$$

$$\lambda_{H\alpha} = 4,8 \cdot 10^{-7} \text{ м},$$

$$\lambda_{He} = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

$$9.2 \quad W_u = chR = 13,6 \text{ еВ}.$$

$$9.3 \quad \omega = v_n / r_n = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ рад/с}.$$

$$9.4 \quad p_m = \frac{e v_n r_n}{2}, \quad \frac{p_m}{L} = \frac{e}{2 m_e},$$

$$p_{m1} = 9,3 \cdot 10^{-24} \text{ Кл} \cdot \text{м}^2/\text{с}.$$

$$9.5 \quad B = \mu_0 \frac{e v_1}{4 \pi r_1^2} = 13,3 \text{ Тл}.$$

$$9.6 \quad \Delta W = hc / \lambda = 4,1 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

$$9.7 \quad \lambda_B = \frac{h}{m_e v}, \quad v_e = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}},$$

$$\lambda_{B1} = 1,2 \cdot 10^{-9} \text{ м}, \quad \lambda_{B2} = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ м},$$

$$\lambda_{B3} = 3,4 \cdot 10^{-11} \text{ м}, \quad \lambda_{B4} = 7,3 \cdot 10^{-10} \text{ м},$$

$$\lambda_{B5} = 6,62 \cdot 10^{-19} \text{ м}.$$

$$9.8 \quad m = \frac{h^2}{2eU\lambda_B^2} = 1,72 \cdot 10^{-17} \text{ кг}.$$

$$9.9 \quad \lambda_B = 1,28 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

$$9.10 \quad W_\kappa = 0,21 \text{ МеВ}.$$

$$9.11 \quad \frac{2\pi r_n}{\lambda_{Bn}} = n.$$

$$9.12 \quad v = \frac{2hl}{m_e \Delta x b} = 2 \cdot 10^6 \text{ м/с}.$$

$$9.13 \quad \Delta x = \frac{hl}{d\sqrt{2eUm_e}} = 4,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

$$9.14 \quad t = -\ln 0,25 / \lambda = 960 \text{ год}.$$

$$9.15 \quad T = \ln 2 / \lambda = 83 \text{ год}.$$

$$\lambda = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ Бк}.$$

$$9.16 \quad \Delta N = N_A \frac{m}{M} \cdot \frac{\ln 2}{T} t = 4,35 \cdot 10^{20}.$$

$$9.17 \quad \Delta N = 5022.$$

$$9.18 \quad \Delta N = 3,9 \cdot 10^{10}.$$

$$9.19 \quad N / N_0 = 0,35.$$

$$9.20 \quad t = T, \text{ де } T \text{ – період піврозпаду}.$$

$$9.21 \quad a_0 = \lambda N_0 = 1,26 \cdot 10^{18} \text{ Бк},$$

$$a = 10^{18} \text{ Бк}.$$

$$9.22 \quad a_0 = N_A \frac{m_0}{M} \cdot \frac{\ln 2}{T} = 1,2 \cdot 10^4 \text{ Бк},$$

$$a = a_0 \cdot 2^{-t/T} \approx a_0.$$

$$9.23 \quad a = 319 \text{ розп/хв}.$$

$$9.24 \quad T = 5,3 \text{ діб}.$$

$$9.25 \quad t = 4107 \text{ років}.$$

$$9.26 \quad w_{y\partial} = (Zm_p + Nm_n - m_\gamma)c^2 / A,$$

$$w_{y\partial \text{ He}} = 7,08 \text{ МеВ},$$

$$w_{y\partial \text{ O}} = 7,98 \text{ МеВ},$$

$$w_{y\partial \text{ Si}} = 8,46 \text{ МеВ},$$

$$w_{y\partial \text{ U}} = 7,6 \text{ МеВ}.$$

$$9.27 \quad 1) W = \frac{m}{M} N_A W_0 =$$

$$= 8,16 \cdot 10^{13} \text{ Дж}, \quad m_C = 2,72 \cdot 10^6 \text{ кг};$$

$$2) m_U = 1,5 \text{ кг}.$$

$$9.28 \quad \Delta Q = 17,3 \text{ МеВ}.$$

$$9.29 \quad m = \frac{APt}{\eta W_0 N_A} = 72 \text{ г}.$$

Список літератури

- 1 Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. – М.: Наука, 1967. – 464 с.
- 2 Иродов И.Е. Задачи по общей физике. – М.: Наука, 1979. – 368 с.
- 3 Офир Дж. Физика: В 2 т. – М.: Мир, 1980. – Т.1. – 336 с.
- 4 Сахаров Д.И. Сборник задач по физике. – М.: Просвещение, 1973. – 288 с.
- 5 Сборник задач по общему курсу физики / Под ред. А.Н. Куценко и Ю.В. Рублева. – М.: Высш. шк., 1972. – 432 с.
- 6 Сборник задач по общему курсу физики: В 2 ч. Ч. 2. Оптика. Молекулярная физика и термодинамика. Атомная физика и физика ядра / В.Л. Гинзбург, Л.М. Левин, М.С. Рабинович и др. – М.: Физматгиз, 1960. – 366 с.
- 7 Стрелков С.П., Эльцин И.А., Яковлев И.А. Сборник задач по общему курсу физики: В 2 ч. Ч. 1. Механика. Электричество и магнетизм. – М.: Физматгиз, 1960. – 312 с.
- 8 Контрольные задания по электричеству и магнетизму / Е.Н. Гладченко, С.П. Гаплевская, Л.С. Завертанная и др. – Харьков: ХАИ, 1988. – 86 с.
- 9 Методические указания к практическим занятиям по механике и молекулярной физике / Е.Н. Гладченко, П.А. Комозынский, Л.С. Завертанная и др. – Харьков: ХАИ, 1985. – 68 с.
- 10 Методические указания к практическим занятиям (оптика, квантовая механика, физика твердого тела) / Г.Д. Никишова, О.М. Либина. – Харьков: ХАИ, 1985. – 70 с.
- 11 Механика, молекулярная физика и термодинамика. Механические колебания. Специальная теория относительности: Сб. задач по физике для студентов высших технических учебных заведений / В.Г. Падалка, Е.Н. Гладченко, Ю.В. Красников и др. – Харьков: ХАИ, 1997. – 156 с.
- 12 Оптика и квантовая механика: Методические рекомендации по практическим занятиям / Е.Н. Гладченко, А.В. Попов и др. – Харьков: ХАИ, 1993. – 50 с.

13 Задачи и упражнения по физике / А.В.Попов, О.И.Петрова, О.В.Подшивалова и др. – Харьков: Нац. аэрокосмический ун-т “Харьк. авиац. ин-т”, 2002. – 91 с.

