

ББК 22.3
Ф 50
УДК 53

Фізика: Конспект вибраних лекцій для студентів заочної форми навчання. Видання четверте, доповнене / Укладач Нікіфоров Ю.М. – Тернопіль: ТНТУ, 2013. – 146 с.

Посібник містить конспект вибраних лекцій та задачі в рамках курсу фізики, що читається для студентів заочної форми навчання в ТНТУ ім. Івана Пулюя за навчальними планами підготовки бакалаврів

Укладач – професор Юрій Нікіфоров

Відповідальний за випуск – професор Леонід Дідух.

**Рецензенти: професор Леонід Дідух;
доцент Юрій Скоренький**

Рекомендовано до друку на засіданні кафедри фізики ТНТУ, протокол №4 від 9 листопада 2010 р.

Схвалено на засіданні методичної комісії факультету комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії ТНТУ, протокол №4 від 25 листопада 2010 р.

ВСТУП

Скорочений до мінімуму об'єм годин, виділених у навчальних планах для викладання фізики, вимагає селективного підходу при відборі матеріалу, що читається на лекціях.

Конспект побудований таким чином, щоб при невеликому об'ємі бути достатнім разом із „міні-практикумом” для відповіді на контрольні запитання при підготовці до лабораторних робіт, розв'язування задач на практичних заняттях, виконання контрольних робіт та служити посібником, що концентрує в собі рівень інформації, необхідний для здавання екзаменів і заліків.

Студенти ознайомляться із магістральними питаннями фізики, їх увага зацентрується на розумінні фізичного змісту явищ. Відбір матеріалу проводився після консультацій із викладачами спеціальних кафедр. Його компонування є таким, що дозволяє показати зв'язок між різними розділами фізики та іншими дисциплінами й напрямки застосування фізичних законів у механіці, енергетиці, електротехніці, мікроелектроніці, інформаційних технологіях.

Крім основного матеріалу, конспект включає: 1) методичні поради і рекомендації для студентів з вивчення фізики; 2) поняття про одиниці та розмірності фізичних величин; 3) таблиці, де наведено відомості про вектори та дії над ними, похідні та інтеграли основних функцій, що часто зустрічаються при аналізі фізичних процесів, законів, їх графіки; 4) список літератури для самостійного опрацювання питань, що не ввійшли до конспекту; 5) контрольні запитання до кожного розділу та приклади розв'язування задач і завдання для самостійного розв'язування; 6) додаток – програмні запитання.

В третьому виданні доповнено розділ 16 (приклади тестових завдань для студентів заочників, що вчаться по скороченій програмі). Внесено приклади задач різного типу та різного рівня із електродинаміки, оптики, атомної та ядерної фізики, а також напівпровідників.

Оскільки за означенням конспект – „це короткий виклад змісту лекції, промови, роботи і т.п.”, то природно, частина питань, що детальніше розглядається в спецкурсах, не висвітлюється.

Автор вдячний завідувачу кафедри, професору Дідуху Л.Д. та доценту Скоренькому Ю.Л. за змістовні зауваження й поради, що сприяли підвищенню якості конспекту. Особливо вдячний співробітниці кафедри, інженеру Зелінській С.С. за постійну висококваліфіковану роботу з оформлення конспекту.

Вважаю необхідним подякувати також за комп'ютерне оформлення останнього видання співробітниці кафедри фізики Парій І.С.

1 МЕТОДИЧНІ ПОРАДИ. ДОВІДКОВІ МАТЕРІАЛИ З МАТЕМАТИКИ

1.1 Методичні поради та рекомендації при вивченні фізики та підготовці до екзаменів і заліків

Для ефективнішого засвоєння лекційного матеріалу рекомендую:

1. Уважно ознайомитися зі змістом конспекту та його побудовою.
2. При читанні конспекту звернути особливу увагу на означення фізичних величин та їх одиниці вимірювання. Поняття про одиниці та розмірності, основні одиниці системи СІ наведені в розділі 1.3.
3. Незрозумілі з першого разу місця уважно перечитати, бажано з олівцем (фломастером) у руках.
4. Для закріплення вивченого матеріалу не тільки розглядати приклади розв'язаних задач, але й спробувати розв'язати задачі із розділу “Для самостійного вивчення”, а також пошукати в конспекті відповіді на контрольні питання, наведені в кінці кожного розділу.
5. Зрозуміти теоретичний матеріал, тобто суть фізичних явищ, доведення формул, а також усвідомити хід розв'язування задач, що наведені в конспекті. Допоможуть у цьому подані у вигляді таблиць довідкові матеріали з математики – математичні поняття, співвідношення, формули, графіки функцій, які найчастіше зустрічаються при вивченні фізики (розділ 1.4).

Краще засвоїти матеріал допоможе література:

- [1] Савельев И.В. Курс общей физики.– М.: Наука, 1982, 2001.
- [2] Яворський Б.М., Детлаф А.А. Курс фізики.– К., 1972; М., 1989.
- [3] Чолпан П.П. Основи фізики.– К.: ВШ, 1995.
- [4] Загальна фізика. Лабораторний практикум / Під ред. І.І.Горбачука.– К.: ВШ, 1992.
- [5] Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики.– М.: Наука, 1979.
- [6] Гончаренко С.У., Ляшко О.І. Основні поняття і закони фізики.– К., 1996.
- [7] Дідух В.Д., Дідух Л.Д., Нікіфоров Ю.М., Пундик А.В. Фізика.– Тернопіль, 1997.
- [8] Дідух Л.Д. Основи механіки.– Тернопіль, 2005.

1.2 Предмет фізики, зв'язок з іншими науками, її роль в інженерній освіті

Фізика – наука про найбільш загальні закони природи. Разом із філософією та математикою вона є однією з найстаріших наук. Філософія є методологічною основою фізики. Завдання фізики – виявити та зрозуміти зв'язок між досліджуваними фізичними величинами та процесами. При цьому важливими є поняття матеріальна точка – тіло, розмірами якого в даній задачі можна знехтувати; система відліку – система координат з тілом відліку і приладом відліку часу; силове поле – простір, у кожній точці якого задана сила; енергія – як кількісна міра взаємодії і перетворень різних форм матерії. Математика дає можливість кількісно описати фізичні явища, створюючи методи такого опису. Однак, на відміну від фізики, математичні побудови є чисто логічними конструкціями, що самі по собі не мають відношення до оточуючого світу. Зміст вони отримують, коли застосовуються до конкретних фізичних задач.

Досвід останніх років свідчить, що техніка та технології швидко застарівають (прикладом можуть служити комп'ютерна техніка та комп'ютерні технології). Фізичні закони, що є фундаментальними законами природи, залишаються незмінними і служать універсальною базою інженерних наук, основою для виникнення нових наукових напрямків, нових технічних та технологічних дисциплін. (За останній час – це квантова

мікроелектроніка, біоніка, ядерна малогабаритна енергетика, космічне матеріалознавство, інформаційні технології).

1.3 Одиниці та розмірності фізичних величин. Система СІ

Дослідження фізичних явищ пов'язані з вимірюванням фізичних величин, для кожної з яких є свої одиниці, тобто свій умовний масштаб.

Одиницею $[A]$ фізичної величини A називається умовно обрана фізична величина, що має ту саму суть, що і дана величина A . Результат вимірювання фізичної величини, як правило, виражається у вигляді чисел (шлях – 100 метрів, температура – 20°C, струм – 5 Ампер і т.д.).

Оскільки в різних країнах одиниці обиралися незалежно між собою, то чисельні значення і їх назви тривалий час були й досі залишаються різними не тільки в різних місцях Землі, а навіть у різних галузях промисловості та науки в тій самій країні (наприклад, енергія вимірюється, як відомо, в кіловат-годинах, джоулях, ергах, мегаелектронвольтах, кілограмометрах, електронвольтах). Це заважає ефективному розвитку економічних зв'язків окремих країн, спілкуванню науковців та “виробників”, упровадженню новітньої технології. Для зручності в 1960 р. прийнята Міжнародна система одиниць СІ (SI).

Усі одиниці вимірювальних систем поділяються на основні та похідні.

Основними одиницями називаються незалежно встановлені одиниці для кількох довільно обраних незалежних фізичних величин. Для зберігання незмінності основних одиниць фізичних величин виготовлені спеціальні еталони, що зроблені з найвищою для даного рівня науки і техніки точністю.

В СІ основних одиниць є 7:

- одиниця вимірювання довжини – 1 метр (м) $[L]$;
- одиниця вимірювання маси – 1 кілограм (кг) – $[M]$;
- одиниця вимірювання часу – 1 секунда (с) – $[T]$;
- одиниця вимірювання температури – 1 Кельвін (К) – $[\Theta]$;
- одиниця вимірювання сили електричного струму – 1 Ампер (А) – $[I]$;
- одиниця вимірювання сили світла – 1 Кандела (Кд) – $[J]$;
- одиниця вимірювання кількості речовини – 1 моль (моль) – $[N]$.

Похідними одиницями називаються одиниці, що встановлюються через основні одиниці на основі фізичних законів або значень, що виражають взаємозв'язок між основними величинами і тими, що розглядаються. Їх дуже багато (для простору і часу, механічних, теплових, електричних, магнітних, світлових, фотометричних величин). Приклади: об'єм $[м^3]$, швидкість $[м/с]$, кількість теплоти $[Дж]$, світловий потік $[Лм]$, освітленість $[люкс]$, напруга $[вольт]$, магнітна індукція $[Тесла]$.

Розмірністю фізичної величини називається вираз, що показує зв'язок даної фізичної величини з фізичними величинами, покладеними в основу даної системи. Розмірність одиниці фізичної величини $dim[A]$ співпадає з розмірністю самої величини A (позначається $dimA$). Тобто: $dim[A]=dimA$. Через розмірності основних одиниць розмірність величини A

$$dim A = L^{n_1} \cdot M^{n_2} \cdot T^{n_3} \cdot \Theta^{n_4} \cdot N^{n_5} \cdot I^{n_6} \cdot J^{n_7}$$

n_1, n_2, \dots, n_7 – раціональні числа, що називаються показниками розмірності.

Приклади встановлення похідної одиниці

а) одиниця сили:

Одиниця встановлюється із формули закону $F = ma$ (другий закон Ньютона) підстановкою в праву частину розмірностей маси m та прискорення a .

Назва одиниці – 1 Ньютон – дорівнює силі, що надає масі 1 кг прискорення 1 м/с^2 у напрямку дії сили

$$1 \text{ Н} = 1 (\text{кг}\cdot\text{м})/\text{с}^2; \quad [F]=\text{LMT}^{-2};$$

б) одиниця роботи:

Одиниця встановлюється на основі означення, що називається роботою, із формули $A = F \cdot s$.

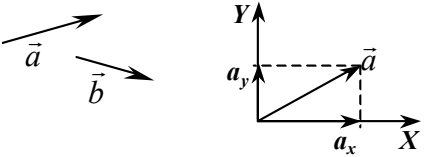
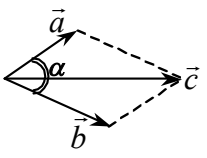
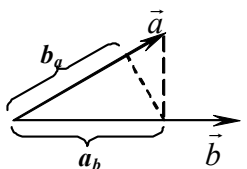
Назва одиниці – 1 Джоуль – дорівнює роботі сили 1 Н, що переміщає тіло на відстань 1 м у напрямку дії сили.

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н}\cdot\text{м} = 1 (\text{кг}\cdot\text{м}^2)/\text{с}^2; \quad [A]=\text{L}^2\text{MT}^{-2}.$$

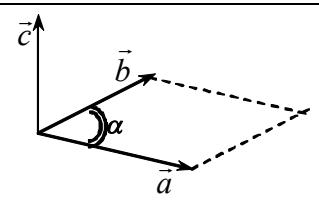
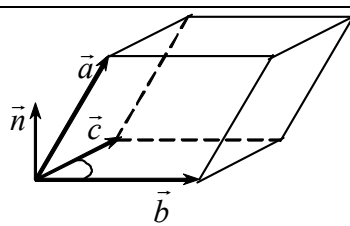
1.4 Вектори та дії з ними. Графіки, похідні, інтеграли деяких функцій, що описують важливі фізичні процеси

Нижче наведено довідковий математичний “мінімум”, необхідний для розуміння матеріалу лекцій та розв’язування задач без звертання до “товстих” підручників. Додаткові пояснення – в тексті таблиць.

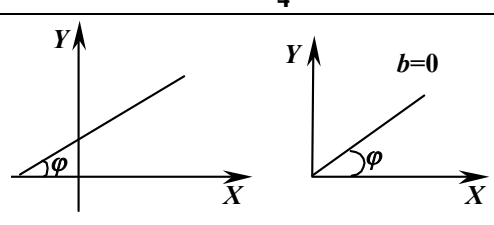
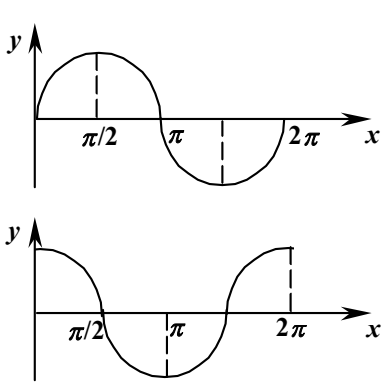
Таблиця 1.1 – Вектори та дії з ними

№ з/п	Елемент векторного аналізу	Позначення, формула	Графічне зображення
1	2	3	4
1	Вектор	$\vec{a} = \vec{i}a_x + \vec{j}a_y + \vec{k}a_z$	 <p>$\vec{a} \perp \text{оси } Z$</p>
	Сума векторів	$\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$ $c = \sqrt{a^2 + 2ab \cos \alpha + b^2}$, c – модуль вектора	 <p>за правилом паралелограма</p>
2	Скалярний добуток векторів	$\vec{c} = \vec{a} \cdot \vec{b} = \vec{b} \cdot \vec{a} = a \cdot b \cos(\hat{a}, b)$ $c = a_b \cdot b = a \cdot b_a$, $c = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z$	 <p>c – скаляр, b_a – проекція вектора b на напрямок вектора \vec{a}, a_b – проекція вектора a на напрямок \vec{b}</p>

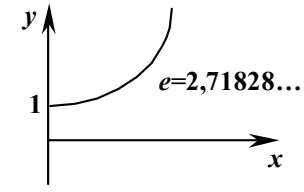
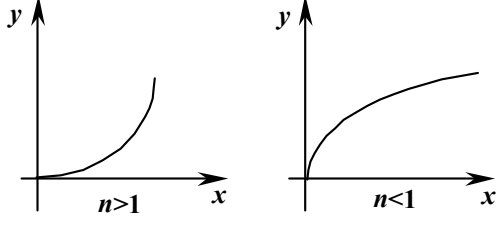
Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4
3	Векторний добуток векторів	$\vec{c} = [\vec{a} \cdot \vec{b}] = \vec{a} \times \vec{b} \quad ,$ $ c = a \cdot b \sin(\hat{a}, \hat{b}),$ $\vec{c} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix}$	 $\vec{a} \times \vec{b} \neq \vec{b} \times \vec{a}$ $\vec{a} \times \vec{b} = -\vec{b} \times \vec{a}$
4	Змішаний (скалярно-векторний добуток)	$V = \vec{a}[\vec{b} \cdot \vec{c}] =$ $= a \left\{ bc \cdot \sin(\hat{b}, \hat{c}) \right\} \cos(\hat{a}, \hat{n}),$ $\vec{n} - \text{нормаль вектора } [\vec{b} \cdot \vec{c}]$	 $\vec{a}[\vec{b} \cdot \vec{c}] = \vec{b}[\vec{a} \cdot \vec{c}] = \vec{c}[\vec{a} \cdot \vec{b}]$ <p>відповідає об'єму паралелепіпеда із сторонами a, b, c</p>

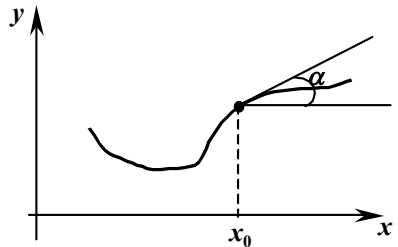
Таблиця 1.2 – Функції, що часто зустрічаються у фізиці

№ з/п	Назва	Формула	Графік
1	2	3	4
1	Лінійна функція (пряма лінія)	$y = kx + b$ $k = \operatorname{tg} \varphi$	
2	Тригонометричні функції	$y = \sin x$ $y = \cos x$	

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4
3	Експонента	$y = e^x$	
4	Степенева функція	$y = x^n$	

Таблиця 1.3 – Правила диференціювання

№ з/п	Означення, правило	Формула, графік
1	2	3
1	Похідна функції f в точці x_0 – це швидкість зміни функції f в цій точці	
2	Похідна функції f в точці x_0 [$f'(x_0)$] дорівнює границі відношення приросту функції f в точці x_0 до приросту незалежної змінної Δx при прямуванні Δx до нуля	$f'(x_0) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta f(x_0)}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x}$  $f'(x_0) = \operatorname{tg} \alpha, \quad \alpha - \text{кут дотичний до графіка в точці } x_0$
3	Похідна суми двох функцій дорівнює сумі їх похідних	$\frac{d}{dx}(f(x) + q(x)) = \frac{d}{dx}f(x) + \frac{d}{dx}q(x)$
4	Похідна функції виду $u(x) = f(x)q(x)$ (добуток двох функцій)	$u'(x) = f'(x)q(x) + f(x)q'(x), \text{ або}$ $\frac{d}{dx}(fq) = q \frac{df}{dx} + f \frac{dq}{dx}$

Продовження таблиці 1.3

1	2	3
5	Похідна функції виду $u(x) = \frac{f(x)}{q(x)}$ (відношення двох функцій)	$u'(x) = \frac{f'(x)q(x) - f(x)q'(x)}{q^2(x)}$, або $\frac{d}{dx} \left(\frac{f}{q} \right) = \frac{q \frac{d}{dx} f - f \frac{d}{dx} q}{q^2}$

Таблиця 1.4 – Похідні та інтеграли деяких функцій

№ з/п	$f(x)$	$f'(x)$	$\int f(x) dx$
1	2	3	4
1	a	0	$ax + C$
2	x^n	nx^{n-1}	$\frac{1}{n+1} x^{n+1} + C$
3	e^x	e^x	$e^x + C$
4	$\frac{1}{x}$	$-\frac{1}{x^2}$	$\ln x + C$
5	$\sin x$	$\cos x$	$-\cos x + C$
6	$\cos x$	$-\sin x$	$\sin x + C$
7	$\frac{1}{\cos^2 x}$	$\frac{2 \sin x}{\cos^3 x}$	$\operatorname{tg} x + C$
8	$\frac{1}{1+x^2}$	$-\frac{2x}{(1+x^2)^2}$	$\operatorname{arctg} x + C$
9	$kx+b$	k	$\frac{kx^2}{2} + bx + C$

Таблиця 1.5 – Розклад деяких функцій в ряд Маклорена

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \dots + (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} \pm \dots \quad |x| < \infty$$

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \dots + (-1)^n \frac{x^{2n}}{2n!} \quad |x| < \infty$$

$$(1+x)^m = 1 + mx + \frac{m(m-1)}{2!} x^2 + \frac{m(m-1)(m-2)}{3!} x^3 + \dots \quad |x| \leq 1 \quad (m > 0)$$

$$|x| \leq 1 \quad (m < 0)$$

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots + \frac{x^n}{n!} \quad |x| < \infty$$

Формула Маклорена:

$$f(x) = f(0) + \frac{x}{1!} f'(0) + \frac{x^2}{2!} f''(0) + \dots + \frac{x^n}{n!} f^{(n)}(0) + \dots + R_n$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} R_n = 0$$

$$R_n = \frac{x^{n+1}}{(n+1)!} f^{(n+1)}(\alpha x) \quad 0 < \alpha < 1$$

Важливість знань математичного "мінімуму" для опису фізичних явищ, впливає хоча б із того, що багато фізичних величин (наприклад, швидкість, прискорення, сила, переміщення, момент сили, імпульс, момент імпульсу, густина струму, магнітна індукція) – вектори, які пов'язані між собою та іншими величинами в багатьох випадках функціональними залежностями, наведеними в таблиці 1.2. Дуже часто функціональні залежності між фізичними величинами та параметрами можна знайти шляхом диференціювання або інтегрування за правилами, наведеними в таблицях 1.3-1.5.

2 МЕХАНІКА ПОСТУПАЛЬНОГО Й ОБЕРТОВОГО РУХУ ТІЛ

Механічним рухом тіла називається зміна його положення в просторі відносно інших тіл. Рух тіла, при якому всі його точки в даний момент рухаються однаково називається поступальним. Тому для опису руху тіла достатньо описати рух його однієї будь-якої точки.

Рух, при якому лінії всіх точок тіла (траєкторії) є колами з центрами на одній прямій, перпендикулярній до площини цих кіл, називається обертотвим рухом.

2.1 Швидкість і прискорення. Лінійна і кутова швидкості. Нормальне і тангенціальне прискорення. Кутове прискорення

Для кількісного аналізу процесу руху тіла вводиться поняття швидкості та прискорення.

У фізиці під швидкістю розуміють векторну величину, що характеризує не тільки переміщення частинки (тіла), але й напрямок, у якому рухається частинка в даний момент часу.

Миттєва швидкість – швидкість тіла в даний момент часу.

$$\vec{g} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \dot{\vec{r}}.$$

Розрізняють, крім того, середню швидкість шляху \mathcal{G} і середню швидкість переміщення \mathcal{G}^* .

$$\mathcal{G} = \frac{\Delta S}{\Delta t}, \quad \mathcal{G}^* = \frac{\Delta r}{\Delta t},$$

де ΔS – шлях, що пройшло тіло за інтервал часу Δt , $\Delta \vec{r}$ – переміщення матеріальної точки за час Δt .

Швидкість – величина векторна і напрямлена по дотичній до траєкторії.

$$g = \sqrt{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2},$$

$[g] = \text{м/с}$.

Рух тіл поділяється на рівномірний (рух з постійною швидкістю) і нерівномірний (рух із прискоренням). Миттєве прискорення

$$\vec{a} = \frac{d\vec{g}}{dt} = \dot{\vec{g}}.$$

Прискорення існує навіть тоді, коли тіло рухається рівномірно, але не прямолінійно, тобто по кривій лінії. Тому вводяться дві складові прискорення – нормальна і тангенціальна. Повне прискорення дорівнює їх векторній сумі.

$$\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau.$$

Прискорення можна розкласти на нормальне (яке характеризує зміну швидкості за напрямком) і тангенціальне (яке характеризує зміну швидкості за величиною). Тангенціальна складова прискорення є єдиною складовою прискорення при поступальному русі по прямій.

Нормальна складова є єдиною складовою прискорення, коли тіло рухається по кривій, в тому числі й по колу, рівномірно. В інших випадках існує дві складові прискорення.

Рух тіла з постійним прискоренням називається рівноприскореним. При цьому

$$\left. \begin{aligned} \vartheta_t &= \vartheta_0 \pm at \\ S &= \vartheta_0 t \pm \frac{at^2}{2} \end{aligned} \right\} a = \text{const}$$

$$[a] = \text{м/с}^2.$$

Складові прискорення та повне прискорення знаходимо за формулами:

$$a_\tau = \frac{d\vartheta}{dt}, \quad a_n = \frac{\vartheta^2}{R},$$

$$a = \sqrt{\left(\frac{d\vartheta}{dt}\right)^2 + \left(\frac{\vartheta^2}{R}\right)^2},$$

R - радіус кривизни, який при русі по колу дорівнює радіусу R кола.

Щоб знайти радіус кривизни, необхідно біля заданої точки A на близькій відстані взяти точку B та провести дотичні до цих точок. На перетині перпендикулярів до дотичних отримаємо центр кривизни (див. рис. 2.1).

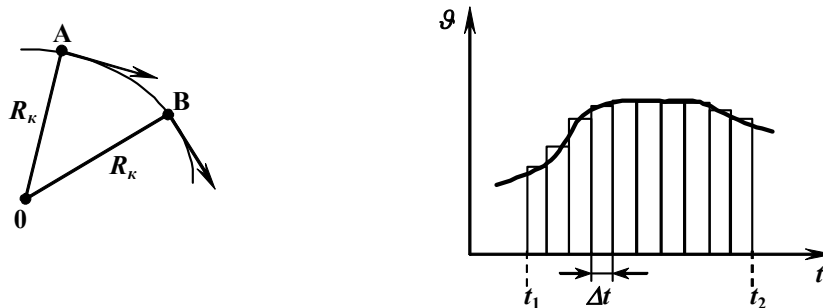


Рисунок 2.1

Якщо зобразити графічно залежність швидкості від часу $\vartheta(t)$, то пройдений шлях можна представити площею фігури, обмеженої кривою $\vartheta(t)$ та прямими t_1 та t_2 (див. рис. 2.1).

А площа цієї фігури

$$S = \int_{t_1}^{t_2} \vartheta(t) dt.$$

Звідси середнє значення швидкості шляху

$$\vartheta_c = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \vartheta(t) dt}{t_2 - t_1} = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} \vartheta(t) dt.$$

При обертовому русі кожна точка тіла описує коло, тому обертовий рух аналізуємо на прикладі руху точки по колу (див. рис. 2.2, 2.3).

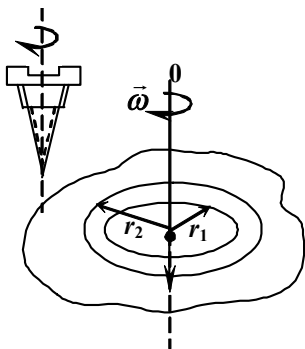


Рисунок 2.2

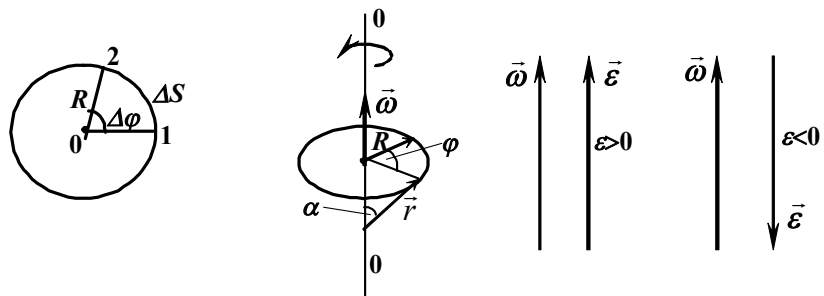


Рисунок 2.3

За означенням $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ - миттєва кутова швидкість. $[\omega]=\text{с}^{-1}$. У випадку рівномірного обертання

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t},$$

де $\Delta\varphi$ - кут, на який повертається тіло за час Δt . При нерівномірному обертанні з'являється кутове прискорення ε .

Кутове прискорення в даний момент часу - миттєве кутове прискорення

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}.$$

При рівноприскореному обертанні тіла

$$\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta t},$$

де $\Delta\omega$ - зміна кутової швидкості за час Δt . $[\varepsilon]=\text{с}^{-2}$

Вважають, що кутова швидкість і кутове прискорення – векторні величини. При цьому напрямки кутової швидкості визначають за правилом правого свердлика.

Напрямок вектора прискорення співпадає із напрямком кутової швидкості, якщо тіло прискорюється. Якщо тіло сповільнюється, тоді $\vec{\omega}$ і $\vec{\varepsilon}$ мають протилежний напрямки (рис. 4).

При русі по колу тіло (матеріальна точка) проходить шлях:

$$\Delta S = R\Delta\varphi.$$

Звідси:

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = R \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}; \quad \frac{dS}{dt} = R \frac{d\varphi}{dt} \rightarrow \mathfrak{G} = \omega R,$$

а вектор $\vec{\mathfrak{G}} = [\vec{\omega} \times \vec{r}]$, де \vec{r} - радіус-вектор, який проводиться із початку координат, що лежить на осі обертання. Із рис. 4 видно, що векторний добуток співпадає з напрямком вектора $\vec{\mathfrak{G}}$ і має модуль $\omega r \sin\alpha = \omega \cdot R$,

$$a_{\tau} = \frac{d\mathfrak{G}}{dt} = \frac{d\omega R}{dt} = R \frac{d\omega}{dt} = \varepsilon R.$$

Задача. Колесо радіуса $R=25$ см обертається так, що лінійна швидкість змінюється з часом за законом $\mathfrak{G} = 3t + t^2$. Знайти кут між вектором повного прискорення та радіусом колеса в момент часу $t=0$, $t=5$ с.

Розв'язок

Шуканий кут α в довільний момент часу визначаємо із рівності

$$\text{tg}\alpha = \frac{a_{\tau}}{a_n}.$$

Оскільки

$$a_{\tau} = \frac{d\mathfrak{G}}{dt} = 2t + 3,$$

$$a_n = \frac{\mathfrak{G}^2}{R} = \frac{(3t + t^2)^2}{R},$$

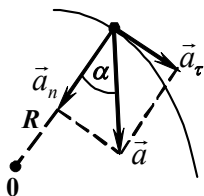


Рисунок 2.4

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{(2t + 3)R}{(t^2 + 3t)^2}.$$

Підставляючи $t=0$, маємо $\operatorname{tg} \alpha = \infty$, тобто $\alpha = \pi/2$. Значить, повне прискорення в момент часу $t=0$ направлене по дотичній. При $t=5$ с $\alpha \approx 11^\circ$. Рис. 2.4 зроблено для моменту часу $t < 5$ с.

2.2 Закони Ньютона

Границі застосування класичної механіки

Закони Ньютона, що лежать в основі класичної механіки, застосовуються для тіл, що рухаються зі швидкістю, яка набагато менша за швидкість світла у вакуумі.

Другим обмеженням застосування є розміри об'єктів, рух яких розглядається, та область простору, в якому розглядається рух.

Як правило, застосування законів класичної механіки обмежується розмірами атомів, тобто величиною l порядку 10^{-10} м. При цьому вже треба враховувати наявність хвильових властивостей у частинок, рух яких розглядається.

Якщо швидкість тіла $\mathcal{G} \sim m = m(\mathcal{G})$, c – швидкість світла у вакуумі ($c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с).

Отримати закони Ньютона можна як частковий випадок загальної теорії відносності і квантової механіки.

Закони Ньютона

Перший закон Ньютона:

|| Тіло знаходиться в стані спокою або рівномірного прямолінійного руху, поки на нього не діють інші тіла.

Існують такі системи відліку, відносно яких тіло рухається з постійною швидкістю, якщо на нього не діють сили. Такі системи називаються інерційними. Перший закон Ньютона справедливий в інерційних системах відліку.

Другий закон Ньютона:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}.$$

|| Прискорення, з яким рухається тіло, є прямо пропорційним силі, що діє на нього, і обернено пропорційне масі тіла.

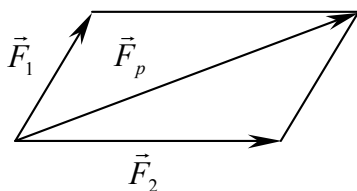


Рисунок 2.5

Сила – величина, що характеризує дію одного тіла на інше, яка в кожен момент часу має напрямок, величину і точку прикладання. Сила – векторна величина. Якщо на тіло діє кілька сил, то результуючу силу знаходять за правилом паралелограма (рис. 2.5). Із наведеної форми запису другого закону Ньютона випливає, що сила – причина, а прискорення – наслідок.

$$[F] = 1 \text{ Н (СИ)}, 1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2.$$

Маса – міра інертності тіла.

Інертність – здатність тіла зберігати свій стан – стан спокою або руху. В загальному випадку:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \beta = \frac{\mathcal{G}}{c},$$

де m_0 – так звана маса спокою, \mathcal{G} – швидкість тіла, c – швидкість світла.

Маса – фізична величина, що також визначає гравітаційні властивості тіла. Кожне тіло створює поле тяжіння, пропорційне масі тіла, і відчуває дію поля тяжіння, створеного іншими тілами.

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} \text{ - закон всесвітнього тяжіння}$$

F – сила притягання тіл з масами m_1 і m_2 , r – відстань між центрами мас тіл, γ – універсальна гравітаційна стала.

Досвід показує, що інерційна і гравітаційна маси (при звичайному виборі одиниць) чисельно рівні між собою (з точністю до 10^{-12}).

Другий закон виражається також через векторну міру руху – імпульс тіла - $\vec{p} = m\vec{v}$. Це – більш загальна форма запису другого закону. Вона має вигляд $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ і

читається так:

|| Сила, що діє на тіло, дорівнює зміні імпульсу тіла за одиничний проміжок часу.

Другий закон Ньютона справедливий тільки для швидкостей, що набагато менші за швидкість світла в вакуумі, і дійсний тільки в інерційних системах відліку.

Третій закон Ньютона справедливий для тіл, що знаходяться в безпосередньому контакті між собою і для тіл, що знаходяться на якійсь відстані, але при цьому є нерухомими (взаємодія через гравітаційне та електричне поле).

|| Третій закон Ньютона стверджує, що сили, з якими діють одне на друге взаємодіючі тіла, є рівними за величиною і протилежними за напрямком. Тобто:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}.$$

Із третього закону Ньютона випливає, що сили виникають попарно: кожній силі, що прикладена до якогось тіла, можна співставити рівну їй за величиною і протилежною за напрямком силу, прикладену до другого тіла, яке взаємодіє з даним.

Усі закони Ньютона є експериментальними, тобто законами, що не доводяться, а постулюються на основі великої кількості експериментів.

2.3 Сили в механіці

2.3.1 Вага тіла. Сили тяжіння, тертя

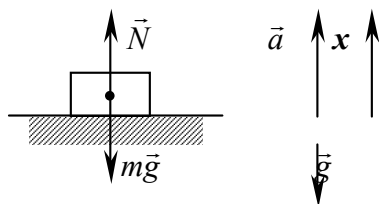


Рисунок 2.6

У механіці найважливішими вважаються вага тіла, сили тяжіння, пружності та тертя.

Вагою тіла називається сила, з якою тіло діє на опору або підвіс.

$$\vec{P} = m\vec{g} = -\vec{N} \text{ (для нерухомої системи).}$$

В загальному, у відповідності до обраного на рис. 2.6 напрямку \vec{a} і \vec{g} :

$$P = m(g \pm a),$$

\vec{a} - прискорення, з яким рухається опора або підвіс.

Сила тяжіння – це практично сила притягання тіла до Землі. Залежить від прискорення вільного падіння g , що як функція відстані тіла до Землі рівна:

$$g_n = \gamma \frac{M_3}{(R_3 + h)^2}.$$

Біля поверхні Землі $g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$, M_3 – маса Землі, γ - гравітаційна стала, R_3 – радіус Землі, h – відстань від тіла до поверхні Землі. Якщо враховувати, що Земля – неінерційна

система відліку, то на екваторі й на полюсі вага відрізняється приблизно на долі процента внаслідок обертання Землі навколо своєї осі.

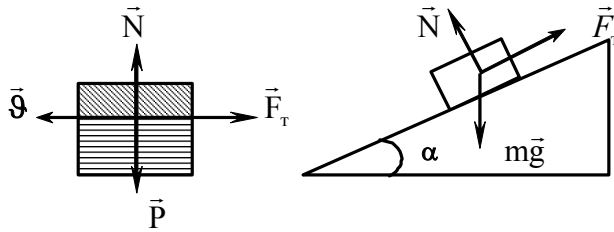


Рисунок 2.7

Сила тяжіння визначається за формулою $F_T = mg$. Якщо тіло разом з опорою падає, то $a=g$ і $P=0$ (зникнення ваги при русі опори із прискоренням g називається невагомістю).

Сили тертя виникають при русі одного тіла по поверхні другого (див. рис. 2.7).

$$F_T = \mu N,$$

μ - коефіцієнт тертя, N - нормальна складова сили реакції, прикладеної до тіла з боку похилої площини. Сила тертя завжди направлена в бік, протилежний до напрямку руху тіла. Сила тертя може змінюватись у залежності від якості обробки поверхні, температури. Розрізняють тертя ковзання і тертя кочення.

Крім цих сил, розрізняють також внутрішнє тертя (в'язкість).

Внутрішнє тертя, яке у випадку руху тіла в рідині називається в'язкістю, залежить від швидкості \mathcal{V} руху тіла. При цьому сила тертя визначається за формулою:

$$F_T = k\mathcal{V}$$

або (при великих \mathcal{V})

$$F_T = k\mathcal{V}^2.$$

Для руху кульки в рідині, газі

$$F_T = 6\pi\eta r\mathcal{V}$$

(закон Стокса), де η - коефіцієнт в'язкості, r - радіус кульки, \mathcal{V} - швидкість руху тіла в рідині, газі.

Сила тертя є важливою характеристикою взаємодії тіл, яка відіграє як позитивну, так і негативну роль. На відміну від інших сил сили тертя є неконсервативними, тобто дисипативними, їх дія призводить до розсіювання енергії. Робота сил тертя по замкнутому шляху не дорівнює нулю, на відміну, наприклад, від сили тяжіння.

2.3.2 Сила пружності. Закон Гука. Пружні модулі

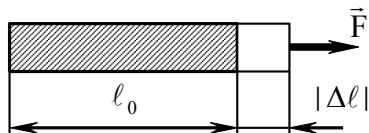


Рисунок 2.8

Деформацією називається зміна розмірів або форми тіла при прикладанні зовнішньої сили. Якщо після припинення дії зовнішньої сили тіло повертається до початкових розмірів та форми, деформація називається пружною. Якщо не повертається – пластичною. Сила, що виникає в результаті деформації тіла і напрямлена в бік, протилежний до переміщення частинок тіла при деформації,

називається силою пружності.

Сила пружності

$$F = -k\Delta l,$$

де k - коефіцієнт пружності, Δl - абсолютне видовження,

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0},$$

ε - відносне видовження.

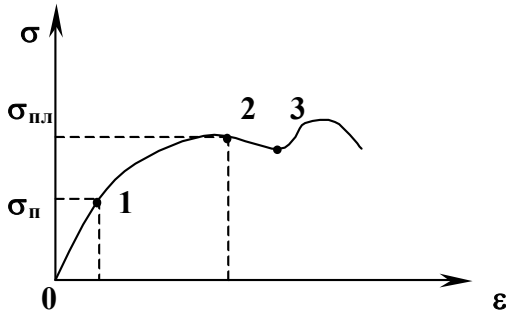


Рисунок 2.9

Всі види деформацій зводяться до двох типів:

- 1) деформація розтягу (стиску);
- 2) деформація зсуву.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Це – закон Гука для пружних деформацій, ε – відносна деформація, E – модуль Юнга.

$$\sigma = \frac{F}{S};$$

F – сила, що прикладається до одиниці площі поперечного перерізу перпендикулярно до нього, σ – нормальне

механічне напруження.

Модуль Юнга – фізична величина, що чисельно дорівнює напруженню, при якому відносне видовження рівне одиниці. Залежить від властивостей речовини та зовнішніх впливів.

Закон Гука справедливий тільки для пружних деформацій (ділянка 0-1 на рис. 2.9). Ділянка 1-2 відповідає області пластичної деформації. Далі ідуть необоротні процеси, які закінчуються руйнуванням.

Механічні властивості матеріалів – їх пластичність і пружність – залежать від кристалічної будови матеріалу, температури, а також наявності домішок.

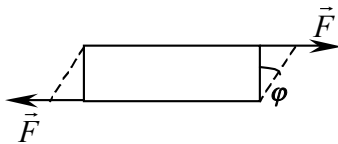


Рисунок 2.10

Для деформації зсуву (рис. 2.10) при малих кутах виконується рівність:

$$\varphi = \frac{\tau}{G},$$

де G – модуль зсуву, τ – тангенціальне напруження, φ – кут зсуву

$$\tau = \frac{F}{S},$$

де S – площа грані, вздовж якої прикладена сила F .

Приклади розв'язання задач на закони динаміки

Щоб уникнути помилок при розв'язуванні задач з динаміки слід:

1. Визначити, з якими тілами взаємодіє тіло, що розглядається, і встановити сили, що діють на це тіло.
2. Зробити схематичне креслення та вказати сили.
3. Написати рівняння руху тіла у векторній формі. Якщо розглядається система пов'язаних між собою тіл, то рівняння записуються для кожного з тіл окремо.
4. Перейти від векторної форми запису рівнянь до їх проєкцій на вибрані напрямки.
5. Якщо кількість невідомих більше числа записаних рівнянь, то необхідно скласти ще й кінематичні рівняння.

Задача. До кінців однорідного стержня прикладені дві протилежно направлені сили $F_1=40$ Н і $F_2=100$ Н (див. рис. 2.11, а). Визначити силу T натягу стержня в поперечному перерізі, що ділить стержень у співвідношенні 1:2 (рис. 2.11, б).

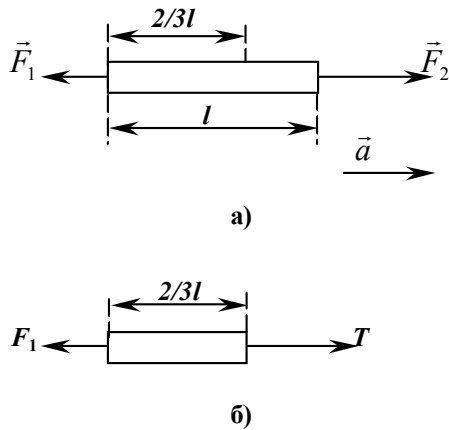


Рисунок 2.11

1. За другим законом Ньютона модуль прискорення, з яким рухається стержень, враховуючи напрямки дії сил,

$$a = \frac{F_2 - F_1}{m}. \quad (1)$$

2. При прискореному русі стержня сили натягу в різних перерізах є різними.
3. Щоб визначити їх, поділимо стержень на дві частини в перерізі, що нас цікавить (1:2) і відкинемо одну із них (наприклад, праву). Дію правої частини замінимо силою натягу T (рис. 2.11, б).
4. Внаслідок дії результуючої сили $T - F_1$ ліва частина масою $m_1 = 2/3m$ повинна рухатись із прискоренням

$$a = \frac{T - F_1}{2m} \cdot 3. \quad (2)$$

5. Оскільки це прискорення рівне за величиною і напрямком прискоренню стержня, то, прирівнюючи праві частини формул (1) і (2), отримаємо:

$$\frac{T - F_1}{2m} \cdot 3 = \frac{F_2 - F_1}{m}$$

$$T = \frac{2F_2 + F_1}{3}$$

Після підстановки значень F_1 і F_2 знаходимо: $T = 80$ Н. Якби $F_1 = F_2$, то $T = F_1 = F_2$.

2.4 Робота і потужність

2.4.1. Робота

Робота сили є мірою дії сили, що залежить від її величини та напрямку і переміщення точки прикладання сили. Якщо

$$F = \text{const} : A = FS \cos \alpha \Rightarrow A = F_s S,$$

де α - кут між напрямком дії сили та переміщенням, F_s – проекція сили на напрямок переміщення.

Робота – скалярна величина і може мати як додатне, так і від'ємне значення в залежності від знака косинуса кута α . Коли переміщення відбувається в напрямку, перпендикулярному до напрямку сили, то вона не впливає на переміщення в даному напрямку, тобто робота даної сили дорівнює нулю. Наприклад, при переміщенні по горизонтальній площині робота сили тяжіння дорівнює нулю.

В загальному випадку ($F \neq \text{const}$) для обчислення роботи вводиться поняття елементарної роботи, що здійснюється на переміщенні dS

$$FdS = dA.$$

Повна робота

$$A_{12} = \int_1^2 FdS.$$

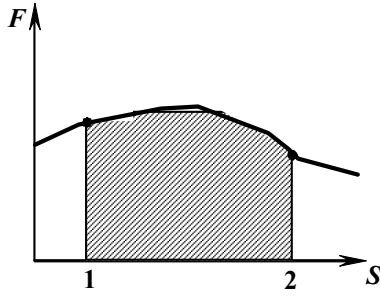


Рисунок 2.12

Цей інтеграл чисельно рівний площі під графіком залежності сили від переміщення (рис. 2.12). У декартових координатах

$$A = \int (F_x dx + F_y dy + F_z dz).$$

$[A] = 1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н}\cdot\text{м}$ (одиниця роботи в СІ).

2.4.2 Потужність

Потужність – характеристика швидкості виконання роботи. Миттєва потужність:

$$N = \frac{dA}{dt}.$$

Середня потужність:

$$N_{cp} = \frac{A}{t},$$

$$N = \frac{dA}{dt} = \frac{F_s dS}{dt} = F_s \mathfrak{v}.$$

$[N] = 1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$ (одиниця потужності в СІ).

2.5 Енергія. Зв'язок роботи зі зміною кінетичної й потенційної енергії

Робота може бути виконана тільки за рахунок зміни енергії.

Енергія – це міра різних форм руху матерії і різних форм взаємодії. Енергія – скалярна величина. В залежності від фізичної природи процесів кажуть про різні форми енергії: механічну, внутрішню, електромагнітну, ядерну і т.д.

Механічна енергія характеризує здатність тіла виконувати роботу.

Кінетична енергія – це енергія рухомого тіла, що визначається співвідношенням

$E_k = \frac{m\mathfrak{v}^2}{2}$. Кінетична енергія при обертвовому русі твердого тіла визначається як сума

кінетичних енергій усіх точок тіла. Оскільки для i -точки тіла, що обертається

$$E_{ki} = \frac{m_i \mathfrak{v}_i^2}{2},$$

$$E_{km} = \sum E_{ki} = \sum \frac{m_i \mathfrak{v}_i^2}{2} = \sum \frac{m_i \omega_i^2 r_i^2}{2} = \frac{\omega_i^2}{2} \sum m_i r_i^2 = \frac{I \omega_i^2}{2},$$

де $I = \sum m_i r_i^2$ - момент інерції тіла, що обертається навколо осі.

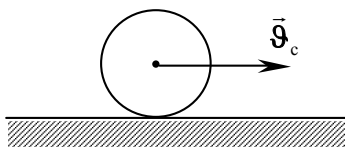


Рисунок 2.13

Плоский рух складається із руху поступального, який відповідає руху центра мас, і обертання навколо центра мас. Тому кінетична енергія тіла в цьому випадку:

$$E_k = E_{kпост} + E_{kоб} = \frac{m\mathfrak{v}_c^2}{2} + \frac{I\omega_c^2}{2},$$

де \mathfrak{v}_c – швидкість центра обертання (центра мас) (рис. 2.13).

Якщо тіло має кінетичну енергію $E_{k1} = \frac{m\mathfrak{D}_1^2}{2}$, то, щоб збільшити її до $E_{k2} = \frac{m\mathfrak{D}_2^2}{2}$, треба виконати роботу

$$A = E_{k2} - E_{k1} = \Delta E_k = \frac{m\mathfrak{D}_2^2}{2} - \frac{m\mathfrak{D}_1^2}{2}.$$

Формула справедлива, коли швидкість $\mathfrak{D} \ll c$ (c – швидкість світла). Якщо умова не виконується, то $E_k = mc^2 - m_0c^2$ де m_0 - маса спокою, m - маса тіла при швидкості \mathfrak{D} .

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{\mathfrak{D}^2}{c^2}}}.$$

Потенціальна енергія - характеризується взаємним положенням тіл або частин одного і того ж тіла. Приклади: тіло, підняте над поверхнею Землі на висоту h , має потенціальну енергію $E_n = mgh$; розтягнута (стиснута) на довжину x пружина має потенціальну енергію $E_n = \frac{kx^2}{2}$.

На відміну від кінетичної енергії, для потенціальної, як бачимо з наведених прикладів, не існує загальної формули.

Однак робота A_{12} , що виконується при зміні потенціальної енергії, від значення E_{n1} до значення E_{n2} , дорівнює $-\Delta E_n$, тобто

$$A_{12} = -(E_{n2} - E_{n1}).$$

Розмірність енергії, як видно із наведених формул, та сама, що й робота. У системі СІ – 1 Дж. Крім того, енергія вимірюється в кіловат-годинах, електрон-вольтах, мегаелектрон-вольтах, ергах.

2.6 Основний закон динаміки для обертового руху

2.6.1 Момент інерції, момент сили

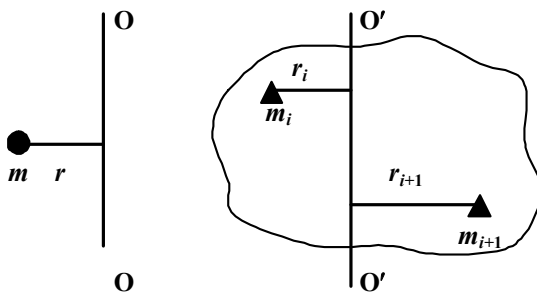


Рисунок 2.14

При обертовому русі важливими характеристиками, що визначають динаміку такого руху, є момент інерції, момент сили та момент імпульсу.

Момент інерції – аналог маси при обертовому русі. Момент імпульсу – це аналог імпульсу при обертовому русі.

Момент інерції – міра інертності тіла при обертовому русі. Момент інерції тіла залежить від форми тіла, його маси та розмірів (див. таблицю).

Для матеріальної точки

$$I = mr^2,$$

де m – маса, r – відстань від даної точки до осі обертання.

Для тіла, що складається із системи матеріальних точок із масою Δm_i , що знаходяться на відстані r_i

$$I = \sum \Delta m_i r_i^2.$$

$$[I] = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

В таблиці наведені формули для визначення моментів інерції тіл різної геометричної форми відносно їх центра мас:

№ з/п	Геометрична форма	Формула
1	Матеріальна точка на відстані r від осі	$I = mr^2$
2	Кільце радіуса R	$I = mR^2$
3	Диск радіуса R	$I = \frac{1}{2} mR^2$
4	Стержень довжиною l	$I = \frac{1}{12} ml^2$
5	Куля радіуса R	$I = \frac{2}{5} mR^2$

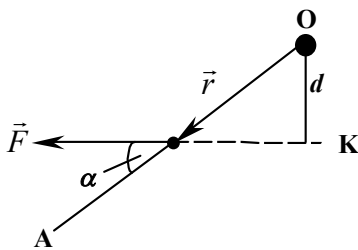


Рисунок 2.15

Момент сили – векторна величина

$$\vec{M} = [\vec{r} \times \vec{F}],$$

\vec{r} – радіус-вектор, проведений від центру обертання до точки прикладання сили, \vec{F} – сила,

$$M = rF \sin \alpha.$$

OK – перпендикуляр, поставлений від точки обертання до лінії, що співпадає з напрямком дії сили, називається плечем (рис. 2.15). $OK = OA \sin \alpha$.

Модуль моменту сили

$$M = Fd.$$

Напрямок моменту сили визначається як напрямок векторного добутку. Корисно пам'ятати, що

$$\vec{M} = \vec{i}M_x + \vec{j}M_y + \vec{k}M_z,$$

$[M] = \text{Н} \cdot \text{м}$. Момент сили відносно осі M_x – величина, що дорівнює проекції на цю вісь моменту сили відносно будь-якої точки осі. Це – скаляр.

2.6.2 Теорема Штейнера

Момент інерції змінюється в залежності від положення осі обертання. В загальному випадку

$$I = \int \rho r^2 dV,$$

де ρ – густина, dV – елементарний об'єм.

Розраховувати моменти інерції I тіл відносно будь-якої осі можна, знаючи моменти інерції тіла відносно осі, що проходить через центр мас і паралельна даній осі, користуючись формулою

$$I = I_0 + md^2,$$

де I_0 – момент інерції тіла відносно осі, що проходить через

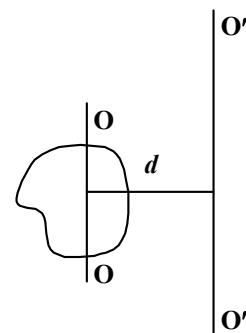


Рисунок 2.16

центр мас і паралельна даній осі, m – маса тіла, d – відстань між осями. Це – теорема Штейнера (див. рис. 2.16).

2.6.3 Основний закон динаміки для обертового руху

За означенням момент імпульсу частинки відносно точки O:

$$\vec{L} = [\vec{r} \times \vec{p}].$$

Напрямок вектора \vec{L} також визначається за правилом векторного добутку.

$$\vec{L} = \vec{i}L_x + \vec{j}L_y + \vec{k}L_z,$$

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \dot{\vec{L}} = \vec{r} \times \frac{d\vec{p}}{dt} + \frac{d\vec{r}}{dt} \times \vec{p} = \vec{M},$$

$$\boxed{\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}}.$$

Швидкість зміни моменту імпульсу дорівнює моменту результуючої сили, що діє на тіло. Це – основний закон динаміки для обертового руху.

При обертанні тіла навколо закріпленої осі z

$$\frac{dL_z}{dt} = M_z -$$

M_z – проекція результуючого моменту сил на вісь z , L_z – проекція моменту імпульсу на вісь Z .

Оскільки

$$L_z = \sum m_i \vartheta_i R_i = \sum m_i \omega_i R_i^2 = \omega \sum m_i R_i^2 = I\omega,$$

то

$$\frac{dL_z}{dt} = \frac{d(I\omega)}{dt} = I \frac{d\omega}{dt} = I\varepsilon. \quad (I = \text{const})$$

Прирівнявши обидва вирази $\frac{dL_z}{dt}$, отримаємо:

$$\boxed{\varepsilon = \frac{M}{I}} -$$

форма запису основного закону динаміки для обертового руху при обертанні навколо нерухомої осі. Це аналог 2-го закону Ньютона, записаного у формі $a = \frac{F}{m}$.

2.7 Закони збереження в механіці

В механіці є три фундаментальні закони збереження: енергії, імпульсу, моменту імпульсу, що пов'язані з фундаментальними властивостями простору і часу.

Закон збереження енергії впливає із однорідності часу. Закон збереження імпульсу впливає із однорідності простору. Закон збереження моменту імпульсу впливає з ізотропності простору. Всі ці закони виконуються в замкнутих системах.

Замкнута система – система, на яку не діють зовнішні сили.

2.7.1 Закон збереження енергії

Найчастіше вживаним є закон збереження енергії.

Як показав досвід, для всіх видів енергії є можливим перехід із одного виду в інший, але при всіх цих переходах і передачах енергії сумарна кількість енергії всіх видів, включаючи і механічну, і всі види внутрішньої енергії, залишається строго сталою. (Це – всезагальний закон збереження енергії).

Закон збереження механічної енергії (кінетична + потенційна енергія) стверджує, що:

В замкнутій системі тіл сума кінетичних і потенційних енергій - величина стала, якщо між тілами діють тільки консервативні сили.

Консервативними називаються сили, робота яких не залежить від шляху, по якому здійснюється переміщення із одного положення в друге.

$$E_p + E_k = const .$$

До консервативних відносяться сили тяжіння, сили пружності, кулонівські.

В полі сил тяжіння $\frac{mv^2}{2} + mgh = const$, тобто повна механічна енергія тіл, що рухаються під дією сил тяжіння, залишається сталою.

Аналогічно, для системи, що складається із пружини і прикріпленого до неї тіла масою m , що взаємодіють за допомогою сил пружності, можна записати на основі закону збереження механічної енергії:

$$\frac{m\vartheta^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = const .$$

2.7.2 Закон збереження імпульсу

Імпульс – це векторна міра механічного руху $\vec{P} = m\vec{\vartheta}$.

Оскільки за другим законом Ньютона

$$\vec{F} = m\vec{a}, \text{ або } \vec{F} = m \frac{d\vec{\vartheta}}{dt} = \frac{d(m\vec{\vartheta})}{dt} \rightarrow \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} .$$

$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ – загальна форма другого закону Ньютона., або $d\vec{p} = \vec{F}dt$. Величину $\vec{F} \cdot dt$ – називають імпульс сили. Таким чином, $d\vec{p}$, – зміна імпульсу тіла, – дорівнює імпульсу сили. Для замкнутої системи виконується закон збереження імпульсу. Для неї:

$\vec{F} = 0$, $\frac{d\vec{p}}{dt} = 0$, $\vec{p} = const$ або для системи тіл, що мають імпульси $\vec{p}_1, \vec{p}_2, \dots, \vec{p}_n$

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n = const .$$

тобто: **Імпульс замкнутої системи є сталою величиною** – це закон збереження імпульсу. Він підтверджує той факт, що взаємодія тіл, які складають замкнуту систему, призводить тільки до обміну імпульсами між цими тілами, але не може змінити руху системи як цілого.

2.7.3 Закон збереження моменту імпульсу

Момент імпульсу при обертанні навколо нерухомої осі L_Z відіграє роль імпульсу при поступальному русі, або, як кажуть, є його аналогом.

Враховуючи, що момент інерції I – аналог маси при обертанні, кутова швидкість ω – аналог лінійної швидкості ϑ і оскільки для замкнутої системи $p = m\vartheta = const$, то для аналогічної величини L_Z у випадку замкнутої системи, коли сума моментів зовнішніх сил дорівнює нулю, можна записати:

$$L_z = I\omega = \text{const}.$$

Це – запис закону збереження моменту імпульсу.

Спрощений варіант доведення наведений нижче. Для замкнутої системи $M_z=0$

$$I\varepsilon = 0 \rightarrow I \frac{d\omega}{dt} = 0 \rightarrow \frac{d(I\omega)}{dt} = 0,$$

тобто знову ж таки

$$I\omega = \text{const}$$

(похідна рівна нулю).

Словами закон збереження моменту імпульсу формулюється так:

Момент імпульсу замкнутої системи є сталою величиною.

2.8 Застосування закону збереження механічної енергії (на прикладі поведінки тіл, що знаходяться в полі сил тяжіння)

Задача. Нехай невагома нерозтяжна нитка може ковзати по жолобу без тертя. До кінців нитки кріпляться вантажі масами $m_1=3,00$ кг та $m_2=1,00$ кг. Вантаж m_1 піднімають настільки, щоб вантаж m_2 доторкнувся до підлоги, і відпускають. Висота $h_1=1,00$ м. На яку висоту h_2 підніметься вантаж маси m_2 після того, як вантаж m_1 вдариться об підлогу?

Розв'язок

У початковий момент вантаж m_1 (і система в цілому) має відносно підлоги потенційну енергію $E_{n11} = m_1gh_1$, яка після відпускання вантажу m_1 іде на збільшення його кінетичної енергії а також кінетичної енергії E_{k2} і потенційної E_{n2} другого вантажу масою m_2 . Оскільки $m_1 > m_2$, то вантаж m_1 буде опускатись, а m_2 – підніматись.

Запишемо закон збереження механічної енергії для двох моментів.

1. У момент удару вантажу m_1 об підлогу, коли другий вантаж піднявся на висоту h_1 .

Оскільки нитка, яка з'єднує вантажі, нерозтяжна і невагома, швидкості вантажів однакові, і на основі закону збереження механічної енергії для замкнутої системи, що розглядається, можна записати (індекси при енергії означають: перший – стан тіла, другий – номер тіла):

$$E_{\text{сум.}} = E_{n11} = E_{k22} + E_{k21} + E_{n22},$$

$$E_{k22} = E_{k21} \cdot \frac{m_2}{m_1} \quad (\text{бо } E_{k22} = \frac{m_2 v_0^2}{2}; E_{k21} = \frac{m_1 v_0^2}{2}),$$

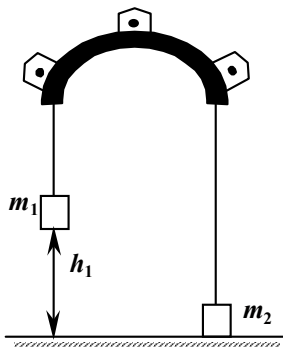
$$m_1gh_1 = E_{k21} + E_{k21} \cdot \frac{m_2}{m_1} + m_2gh_1 = E_{k21} \left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right) + m_2gh_1,$$

$$E_{k21} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} m_1gh_1, \quad E_{k22} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} m_2gh_1.$$

2. Для другого вантажу при піднятті його на максимальну висоту h_2 (при цьому $\mathcal{G}=0$) закон збереження енергії набуде вигляду:

$$E_{n23} = E_{n22} + E_{k22}.$$

Після підстановок ($g=9,8$ м/с²) і спрощень отримаємо:



$$m_2 g h_2 = m_2 g h_1 + \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} m_2 g h_1 = m_2 g h_1 \left(1 + \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \right),$$

$$h_2 = \frac{2m_1 h_1}{m_1 + m_2}, \quad h_2 = 1,5 \text{ м.}$$

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ “МЕХАНІКА ПОСТУПАЛЬНОГО І ОБЕРТОВОГО РУХУ”

1. Яка швидкість називається середньою, миттєвою? Одиниці вимірювання швидкості.
2. Коли існує тільки нормальне прискорення, а коли – тільки тангенціальне? Одиниці їх вимірювання.
3. Тіло кинуто під кутом до горизонту. Прискорення земного тяжіння $g=8,8 \text{ м/с}^2$ вважаємо нормальним, повним чи тангенціальним?
4. Дати означення кутової швидкості та кутового прискорення, назвати одиниці їх вимірювання.
5. Записати формули, що показують зв'язок між кутовою та лінійною швидкостями, кутовим та лінійним прискореннями.
6. Сформулювати закони Ньютона. Які межі їх застосування?
7. Перерахуйте відомі вам сили, що розглядаються в механіці.
8. Що називається роботою? Потужністю? Їх одиниці вимірювання.
9. Коли справедливий закон збереження механічної енергії? Сформулювати узагальнений закон збереження енергії.
10. Що називається моментом сили? Моментом імпульсу?
11. Що служить аналогом маси при обертовому русі?
12. Формула моменту інерції та одиниці його вимірювання.
13. Як формулюється основний закон динаміки для обертового руху тіла навколо нерухомої осі?
14. Як зміниться кутова швидкість обертання платформи з людиною, якщо людина перейде з краю платформи до її центру? Пояснити на основі закону збереження моменту імпульсу.
15. Записати формули, що описують кінетичну енергію поступального та обертового рухів. Що впливає з такого порівняння?

3 КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ. РІВНЯННЯ КОЛИВАННЯ

3.1 Амплітуда, фаза, період, частота гармонічних коливань

Коливаннями називаються процеси, що характеризуються певним ступенем повторюваності.

На рис. 3.1 наведені різні види коливальних процесів, що об'єднують між собою різні явища природи, фізичні об'єкти та системи. Наприклад, механічні коливання маятників, електричні коливання в LC контурі, мікрочастинки (хвиля-частинка).

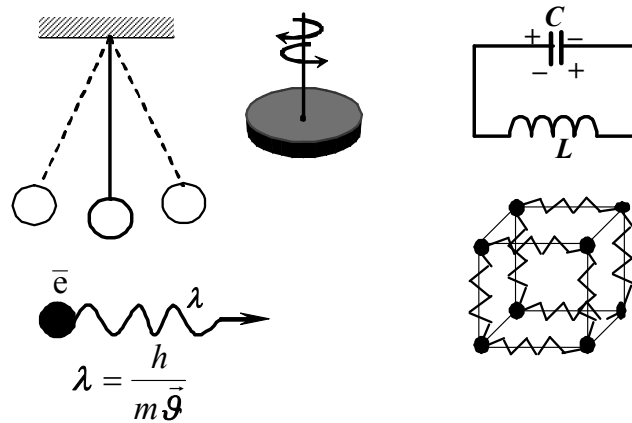
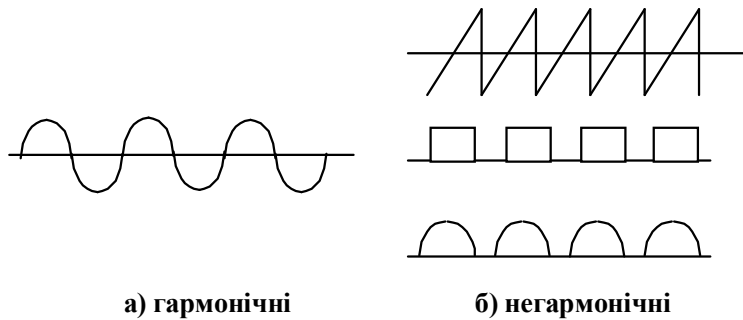


Рисунок 3.1

Процес розповсюдження коливань в просторі називається хвилею.

Коливання поділяються на:

1. Вільні:



а) гармонічні

б) негармонічні

Рисунок 3.2

2. Затухаючі (згасаючі).

3. Вимушені.

4. Автоколивання.

5. Параметричні.

Гармонічними називаються коливання, які відбуваються за законом синуса або косинуса.

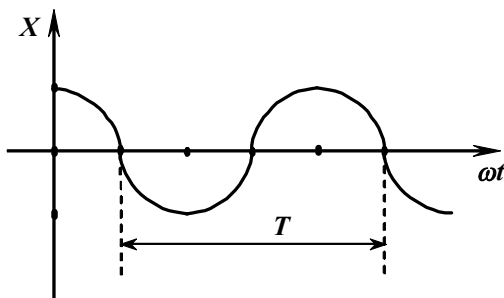


Рисунок 3.3

$$x = x_0 \cos(\omega t + \varphi_0),$$

$$x = x_0 \sin(\omega t + \varphi_0),$$

де x – зміщення тіла від положення рівноваги в момент часу t , x_0 – амплітуда коливання (максимальне зміщення тіла від положення рівноваги), ω – циклічна частота, φ_0 – початкова фаза (характеризує зміщення тіла від положення рівноваги в початковий момент часу) (рис. 3.3).

Час, протягом якого здійснюється одне повне коливання, називається періодом.

Частота – кількість коливань за одиницю часу.

$$T = \frac{1}{\nu}, \quad \omega = 2\pi\nu,$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T},$$

$[\omega] = \text{Гц}$; $[\nu] = \text{с}^{-1}$; 1 Гц = 1 коливання/секунду.

3.2 Математичний та фізичний маятники як приклади коливальних систем

Математичним маятником називається матеріальна точка, підвішена на невагомій, нерозтяжній нитці (рис. 3.4).

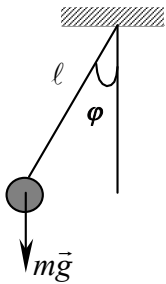


Рисунок 3.4

Використаємо основний закон динаміки для обертового руху:

$$I\varepsilon = M, \quad \varepsilon = \ddot{\varphi},$$

$$M = mg\lambda \sin \varphi.$$

Тоді для математичного маятника:

$$m\lambda^2 \ddot{\varphi} = -mg\lambda \cos \varphi, \quad (\varphi - \text{малий кут})$$

$$\lambda \ddot{\varphi} = -g\varphi.$$

Це – диференціальне рівняння другого порядку. Його розв'язок:

$$\varphi = \varphi_0 \cos(\omega t + \alpha_0),$$

звідси

$\omega = \sqrt{\frac{g}{\lambda}}$ – частота коливань математичного маятника.

$T = \frac{2\pi}{\omega} \rightarrow T_m = 2\pi \sqrt{\frac{\lambda}{g}}$ – період коливань математичного маятника.

Фізичним маятником називається тіло, підвішене вище центра мас, що здатне коливатись (рис. 3.5).

Фізичний маятник здійснює гармонічні коливання, які також описуються диференціальними рівняннями другого порядку.

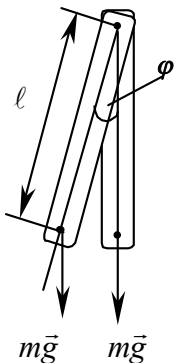


Рисунок 3.5

$$I\varepsilon = M,$$

$$I\ddot{\varphi} = -mg\lambda \sin \varphi,$$

$$I\ddot{\varphi} = -mg\lambda\varphi, \quad (\varphi \ll 1)$$

$$\varphi = \varphi_0 \cos(\omega t + \alpha_0),$$

$$\omega = \sqrt{\frac{mg\lambda}{I}},$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mg\lambda}},$$

$$l_n = \frac{I}{m\lambda},$$

l_n – зведена довжина – така довжина математичного маятника, період коливань якого рівний періоду коливань даного фізичного маятника.

Звідси:

$$T_{\phi} = 2\pi \sqrt{\frac{I_n}{g}}$$

Задача. Фізичний маятник складається із стержня довжиною ℓ , масою $4m_1$ та кільця діаметром $d=\ell/2$ і масою m_1 , що приварене до кінця стержня. Маятник закріплено на горизонтальній осі, яка проходить через середину стержня, перпендикулярно до нього. Знайти період коливань T маятника.

Розв'язок

1. Період коливань фізичного маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mg\ell_c}}, \quad (\text{а})$$

де I – момент інерції маятника відносно осі коливань, m – його маса, ℓ_c – відстань від центра мас до осі коливань.

2. Момент інерції дорівнює сумі моментів інерції стержня I_1 та кільця I_2 :

$$I = I_1 + I_2, \quad (\text{б})$$

$$I_1 = \frac{1}{12} m_{\text{ст}} \ell^2 = \frac{1}{3} m_1 \ell^2,$$

(див. табл. п. 1.3 конспекту), I_2 знайдемо, застосувавши теорему Штейнера

$$I = I_0 + ma^2,$$

$$I_2 = m_1 \left(\frac{\ell}{4} \right)^2 + m_1 \cdot a^2,$$

де a – відстань між вказаними осями. За умовою задачі:

$$a = \frac{\ell}{2} + \frac{\ell}{4} = \frac{3}{4} \ell.$$

Звідси маємо:

$$I_2 = m_1 \left(\frac{\ell}{4} \right)^2 + m_1 \left(\frac{3}{4} \ell \right)^2 = \frac{5}{8} m_1 \ell^2.$$

3. Підставивши вирази I_1 та I_2 у формулу (б), отримаємо:

$$I = \frac{1}{3} m_1 \ell^2 + \frac{5}{8} m_1 \ell^2 = \frac{23}{24} m_1 \ell^2. \quad (\text{в})$$

4. Відстань ℓ_c від осі маятника до центра мас

$$\ell_c = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i} = \frac{4m_1 \cdot 0 + m_1 \frac{3\ell}{4}}{4m_1 + m_1} = \frac{3}{20} \ell. \quad (\text{г})$$

5. Підставимо (в) та (г) і знайдемо період коливань

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{23}{24} m_1 \ell^2 \cdot \frac{20}{3\ell \cdot 5m_1 g}} \approx 2\pi \sqrt{1,3 \frac{\ell}{g}}.$$

3.3 Затухаючі (згасаючі) та вимушені коливання

3.3.1 Затухаючі коливання, коефіцієнт затухання (згасання). Логарифмічний декремент затухання (згасання)

$$ma = -kx, \quad x = x_0 \cos(\omega t + \varphi_0) -$$

це рівняння незатухаючого коливання і його розв'язок.

Затухаюче коливання – це коливання, амплітуда якого з часом зменшується. Рівняння затухаючого коливання:

$$m\ddot{x} = -kx - r\dot{x}$$

(крім пружної сили kx у рівнянні з'явилась сила тертя $r\dot{x}$).

Розв'язок рівняння:

$$x = x_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0),$$

$$\beta = \frac{r}{2m},$$

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

де β – коефіцієнт затухання. $[\beta] = \text{с}^{-1}$,

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

власна частота коливальної системи.

Графік колювання, що затухає (згасає), показана на рис. 3.6.

Якщо

$$t_2 = t_1 + T,$$

то

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{x_0 e^{-\beta t_1}}{x_0 e^{-\beta t_1 - \beta T}} = e^{\beta T},$$

$$\ln \frac{x_1}{x_2} = \beta T = d,$$

де d – логарифмічний декремент затухання (згасання).

Як бачимо, логарифмічний декремент затухання (згасання) – це натуральний логарифм відношення двох послідовних амплітуд (безрозмірна величина).

Фізичний зміст величин:

Коефіцієнт затухання – величина, обернена до часу, протягом якого амплітуда колювань зменшується в e разів (де e – основа натурального логарифма).

Логарифмічний декремент затухання – величина, обернена до кількості колювань, протягом яких амплітуда зменшується в e разів.

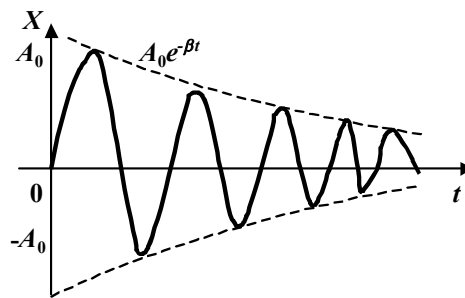


Рисунок 3.6

3.3.2 Вимушені колювання. Явище резонансу та його умови. Резонанс у техніці

Вимушеними називаються колювання, що відбуваються під дією зовнішньої вимушуючої сили. Вимушені колювання будуть гармонічними, якщо вимушуюча сила буде діяти за гармонічним законом, наприклад, $F_0 \cos \omega t$. Тоді для вимушеного колювання можна записати:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= -kx - r\dot{x} + F_0 \cos \omega t \rightarrow \beta = \frac{r}{2m} \\ m\ddot{x} + kx + r\dot{x} &= F_0 \cos \omega t \rightarrow f_0 = \frac{F_0}{m} \\ \ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x &= f_0 \cos \omega t \rightarrow \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \end{aligned} \right\}$$

Розв'язком даного диференціального рівняння є гармонічна функція

$$x = x_0 \cos(\omega t - \varphi_0)$$

Після диференціювання та підстановки, отримаємо:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -\omega x_0 \sin(\omega t - \varphi_0) = \omega x_0 \cos\left(\omega t - \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right), \\ \ddot{x} &= -\omega^2 x_0 \cos(\omega t - \varphi_0) = \omega^2 x_0 \cos(\omega t - \varphi_0 + \pi), \\ \omega^2 x_0 \cos(\omega t - \varphi_0 + \pi) + 2\beta\omega x_0 \cos\left(\omega t - \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right) + \omega_0^2 x_0 \cos(\omega t - \varphi_0) &= f_0 \cos \omega t.\end{aligned}$$

Кожна складова представляється вектором. Зв'язок їх довжин

$$f_0^2 = (\omega_0^2 - \omega^2)^2 x_0^2 + 4\beta^2 \omega^2 x_0^2$$

впливає із правил додавання векторів, зсунутих по фазі відносно осі відліку, відповідно до векторного представлення коливань (див. рис. 3.7).

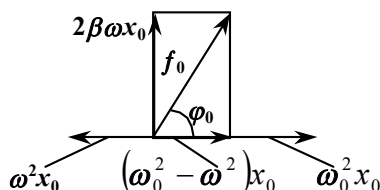


Рисунок 3.7

Із малюнка також видно, що:

$$\begin{aligned}x_0 &= \frac{f_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}}, \\ \operatorname{tg} \varphi_0 &= \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}.\end{aligned}$$

Оскільки

$$x = x_0 \cos(\omega t - \varphi_0),$$

то звідси загальний вигляд рівняння вимушених коливань:

$$x = \frac{F_0}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}} \cos\left(\omega t - \operatorname{arctg} \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}\right).$$

Явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань при співпаданні частоти вимушуючої сили з резонансною частотою системи називається резонансом.

Резонансна частота – це частота, при якій амплітуда коливань є максимальною. Якщо коефіцієнт згасання прямує до нуля, то резонансна частота приймається рівною власній частоті коливань системи.

Графік коливань впливає з аналізу рівняння вимушених коливань, записаного у загальному вигляді.

Явище резонансу необхідно враховувати при аналізі роботи приладів, механізмів, будівельних конструкцій, літаків, ракет, де відбуваються процеси вібрації.

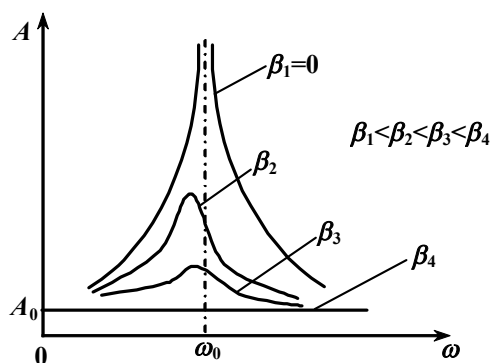


Рисунок 3.8

3.3.3 Біжучі й стоячі хвилі. Вузли та пучності

Як уже відзначалося, хвилею називається процес розповсюдження коливань у середовищі.

Рівняння біжучої хвилі найпростішого виду описується формулою:

$$\xi = \xi_0 \cos\left(\omega t \mp \frac{2\pi x}{\lambda}\right),$$

де ξ – зміщення точки від положення рівноваги, ξ_0 – амплітуда зміщення, x – координата точки, що коливається, λ – довжина хвилі, $\omega = 2\pi\nu$.

Хвиля, у якої амплітуда зміщення для всіх точок однакова, називається біжучою.

Хвиля, що утворюється при накладанні прямої і відбитої біжучої хвилі, називається стоячою. Амплітуда стоячої хвилі залежить від координати. Точки, в яких амплітуда дорівнює нулю, називаються вузлами. Точки, в яких амплітуда є максимальною, називаються пучностями. На рис. 3.9 показано утворення стоячої хвилі.

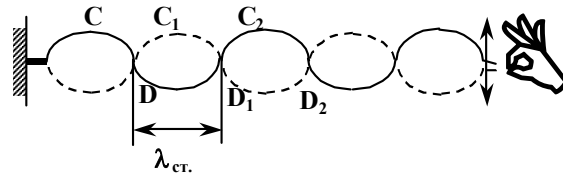


Рисунок 3.9

Довжина стоячої хвилі

$$\lambda_{ст} = \frac{\lambda_{біж}}{2} \rightarrow \xi_{np.} = \xi_0 \cos(\omega t - kx),$$

$$\xi_{відб.} = \xi_0 \cos(\omega t + kx), \quad \xi_{рез.} = \xi_{np.} + \xi_{відб.},$$

тобто

$$\xi_{рез.} = 2\xi_0 \cos \omega t \cos kx,$$

або:

$$\xi_{рез.} = 2\xi_0 \cos \omega t \cos \frac{2\pi}{\lambda} x.$$

Звукові хвилі – це механічні хвилі з частотою від 16 Гц до 20 кГц.

Хвилі, що мають вищу частоту, називаються ультразвуковими.

Хвилі, що мають нижчу частоту, називаються інфразвуковими.

Суб'єктивні характеристики звукових хвиль: гучність, висота, тембр.

Об'єктивні характеристики звукових хвиль: інтенсивність звуку, основна частота, гармонічний спектр.

Інтенсивність звуку вимірюється в децибелах.

1 дБ = 10 lg I/I₀, де I₀ – поріг чутливості, I – інтенсивність звуку.

Інтенсивність – це середня потужність хвилі за період, яка припадає на одиницю площі.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ “КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ”

1. Які коливання називаються гармонічними? Їх рівняння.
2. Що таке амплітуда, фаза, частота, період коливання?
3. Коли коливання будуть згасаючими (затухаючими)?
4. Які коливання називаються вимушеними?
5. Що називається резонансом? Його застосування в техніці.
6. Дати означення хвилі та записати найпростіше рівняння хвилі.
7. Що таке інтерференція хвиль?
8. Які хвилі називаються стоячими? Як вони утворюються? Що таке вузли та пучності?
9. Наведіть приклади хвильових процесів.
10. Математичний маятник та його період.
11. Приведена (зведена) довжина фізичного маятника.

4 ТЕПЛОТА ТА ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ

4.1 Молекулярно-кінетичний та термодинамічний підходи. Рівняння стану ідеального газу. Газові закони. Ізопроцеси. Моль, число Авогадро

Молекулярно-кінетичний підхід базується на молекулярно-кінетичній теорії (МКТ) і встановлює зв'язок між параметрами тіла, які можуть бути виміряні експериментально (тиск, температура, об'єм – так звані макропараметри), і усередненими характеристиками молекул, що входять до їх складу (середньою енергією, швидкістю, концентрацією).

МКТ базується на таких твердженнях:

1. Усі речовини складаються з атомів і молекул.
2. Молекули знаходяться в постійному хаотичному русі, який зростає зі зростанням температури.
3. Між атомами і молекулами існують сили притягування і відштовхування.

Слід пам'ятати, що кожна окрема молекула (атом) мають енергію і швидкість, які відрізняються від середніх значень. Тому при опису системи враховують статистику, тобто розподіл частинок за енергіями або швидкостями, для чого використовують математичний апарат теорії ймовірності.

Термодинамічний підхід базується на найбільш фундаментальних законах природи. Ці закони встановлені на основі великої кількості експериментів, справедливі для всіх відомих явищ і тому називаються початками.

Фундаментальними законами, якими користується термодинаміка, є:

- 1-й закон (початок), який є фактично законом збереження енергії;
- 2-й закон (початок), який вказує напрямком протікання процесів у природі.

В термодинаміці використовуються однозначні функції, які характеризують стан системи: внутрішня енергія (U), ентропія (S), вільна енергія (F), ентальпія (H).

Розглядаючи зміни речовини з різних позицій, термодинаміка і МКТ є фактично єдиним цілим.

Ідеальний газ – це теоретична модель газу, в якій не враховується взаємодія частинок газу (середня кінетична енергія частинок набагато більша енергії взаємодії).

В ідеальному газі молекули, в більшості випадків, вважаються матеріальними точками, які мають тільки кінетичну енергію. Тому внутрішня енергія ідеального газу, тобто енергія всіх частинок, з яких складається даний газ, є сумою їх кінетичних енергій. В реальному газі внутрішня енергія складається з кінетичної і потенційної енергій молекул.

Розрізняють класичний і квантовий ідеальний газ – їх поведінка описується різними статистиками. Ми розглядаємо класичний ідеальний газ, що описується статистикою Максвелла-Больцмана.

Стан системи (сукупності тіл) виражається в загальному вигляді як:

$$F(p, V, T) = 0.$$

Стан класичного ідеального газу описує рівняння Менделєєва-Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{\mu} RT,$$

де p – тиск, V – об'єм, m – маса газу, μ – молекулярна маса газу, R – універсальна газова стала ($R=8,31$ Дж/моль·К), T – температура в К.

Кількість речовини ν – це фізична величина, що дорівнює числу структурних елементів, які складають систему, $\nu = \frac{m}{\mu}$.

|| Кіломооль – це кількість речовини, в якій знаходиться стільки ж молекул, скільки їх в 12 кг ізотопу C_6^{12} .

Один моль – відповідно кількість речовини, в якій знаходиться стільки ж молекул, скільки їх в 0,012 кг ізотопу ${}_6C^{12}$. Це – стала Авогадро. $N_A \approx 6.02 \cdot 10^{23}$ 1/моль.

Стан реального газу описується рівнянням Ван-дер-Ваальса:

$$\left(p + \frac{a}{V_{KM}^2} \right) (V_{KM} - b) = RT.$$

Тут враховано, що молекули мають кінцеві розміри, а крім кінетичної вони мають потенційну енергію. a , b – константи, V_{KM} – об'єм кіломоля газу.

Перехід системи з одного рівноважного стану в інший називається **процесом**.

У залежності від умов протікання розрізняють:

$p = \text{const}$ - ізобарний процес;

$T = \text{const}$ - ізотермічний процес;

$V = \text{const}$ - ізохорний процес.

Процес, що відбувається без обміну енергією з зовнішнім середовищем, називається адіабатним.

Оскільки

$$p = \frac{\rho}{\mu} RT,$$

(впливає із рівняння стану ідеального газу)

$$N_A = \frac{R}{k},$$

де k - стала Больцмана ($k \approx 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К), то:

$$p = \frac{\rho}{\mu} k N_A T \rightarrow$$

$$\boxed{p = nkT},$$

де n - концентрація молекул,

$$n = \frac{N}{V} = \frac{\rho}{\mu} N_A.$$

Задача. На рис. 4.1 показано ізотерми для двох різних газів, що мають однакову температуру і масу. Визначити, яка ізотерма відповідає газу, що має меншу молярну масу μ .

Розв'язок

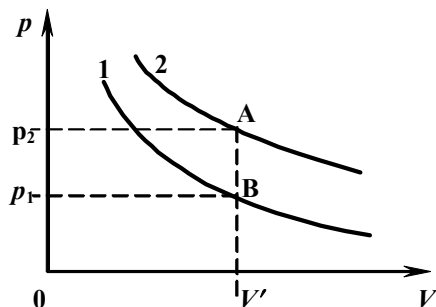


Рисунок 4.1

1. Розглянемо на різних ізотермах два стани – **A** і **B**, яким відповідає однаковий об'єм V' і запишемо рівняння Менделєєва-Клапейрона для цих станів:

$$a) p_1 V' = \frac{m}{\mu_1} RT,$$

$$б) p_2 V' = \frac{m}{\mu_2} RT.$$

2. Розділивши почленно рівняння (а) на (б), отримаємо:

$$\mu_2 = \frac{p_1}{p_2} \mu_1.$$

3. Оскільки $p_1 < p_2$, то $\mu_2 < \mu_1$. Значить, ізотерма 2 відповідає газу, що має меншу молярну масу.

Ізотерма виражається формулою

$$pV = \frac{m}{\mu} RT = \text{const}.$$

Значить, чим більша ця константа, тим далі від початку координат pV вона розташована. А її величина має різні значення при різних m, μ, T .

4.2 Теплоємність речовини

Внутрішня енергія газу U складається з енергії молекул, що входять до складу цього газу.

Для N молекул:

$$U = \frac{i}{2} NkT.$$

Для одного кіломоля газу, в якому N_A молекул:

$$U_{\text{КМ}} = \frac{i}{2} N_A kT = \frac{i}{2} RT$$

($R = kN_A$).

Внутрішня енергія тіла може збільшуватися за рахунок виконання над ним роботи, або шляхом теплопередачі. При теплопередачі робота виконується на мікрорівні, шляхом обміну енергіями окремих молекул, і не пов'язана з переміщенням зовнішніх тіл.

Кількість енергії, що передається тілу шляхом теплопередачі, називається кількістю теплоти.

Кількість теплоти, яка необхідна для зміни температури тіла на один градус (Кельвін), називається теплоємністю тіла.

$$c = \frac{\delta Q}{\delta T},$$

де δQ - елементарна кількість теплоти, надана тілу, δT - відповідна зміна температури.

Питомою теплоємністю називається кількість теплоти, яку необхідно надати одиниці маси тіла, щоб змінити її температуру на один градус (К).

$$c = \frac{\Delta Q}{m\Delta T},$$

[c] = Дж/(кг·К).

Молярною теплоємністю називається кількість теплоти, необхідна для нагрівання одного кіломоля або одного моля речовини на один градус (К):

$$c_\mu = \frac{\Delta Q}{\mu\Delta T}.$$

В залежності від умов теплопередачі, кількість теплоти, необхідна для нагрівання тіла на 1 К, відрізняється, тому розрізняють теплоємність при сталому тиску (c_p) і теплоємність при сталому об'ємі (c_V).

Для ідеального газу

$$c_p = c_V + R$$

тобто $c_p > c_V$ (доведення цього дано далі).

4.3 Закони (начала) термодинаміки

4.3.1 Перший закон термодинаміки

Перший закон (начало) термодинаміки формулюється так:

|| Кількість теплоти, що надана системі, йде на приріст внутрішньої енергії і виконання системою роботи над зовнішніми тілами.

Рівняння, що описують перший закон:

$$Q = \Delta U + A \rightarrow Q = U_2 - U_1 + A \rightarrow \delta Q = dU + \delta A,$$

де δQ – елементарна кількість теплоти, dU – приріст внутрішньої енергії, δA – елементарна робота.

$$\oint dU \equiv 0 -$$

тобто dU – повний диференціал системи.

Внутрішня енергія не залежить від шляху переходу системи із одного стану в інший.

Перший закон термодинаміки стверджує, що не можна виконати більше роботи, ніж підведена теплота або енергія. По-іншому це означає, що **не можливий вічний двигун першого роду, тобто двигун, який би виконував більшу роботу, ніж підведена до нього теплота (надана йому енергія).**

4.3.2 Другий закон термодинаміки

Другий закон термодинаміки, як і перший, впливає із дослідів і формулюється в кількох видах:

1. Неможливий процес передачі теплоти від менш нагрітого тіла до більш нагрітого, що відбувається в системі без змін в оточуючому середовищі.

2. Неможливий вічний двигун другого роду, тобто такий періодично діючий механізм, що перетворює всю отриману теплоту в роботу.

3. Ентропія замкнутої системи не може зменшуватися, вона може тільки зростати або, досягнувши максимального значення, не змінюватись. Ентропія – спеціальна функція, що є мірою безпорядку в системі.

Останнє визначення пов'язане із статистичним змістом другого закону термодинаміки, хаотичним характером розподілу молекул, що входять у систему, по енергіях, і які обмінюються між собою енергією при взаємодії.

4.4 Теплові машини. ККД теплової машини. Цикл Карно

Другий закон термодинаміки вказує напрямок протікання процесу, він заперечує створення вічних двигунів другого роду, тобто таких, що всю підведену теплоту перетворюють у роботу.

Всі процеси поділяються на оборотні та необоротні, прямі і зворотні та цикли.

Прямий процес – процес переходу із початкового стану 1 в кінцевий стан 2.

Зворотний процес – процес, у результаті якого система повертається із стану 2 в початковий стан 1.

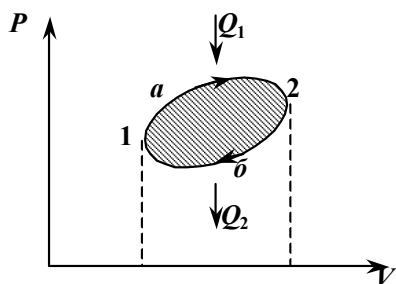


Рисунок 4.2

так що процес вважатиметься із достатньою точністю оборотним, наприклад, це відноситься до адіабатичного розширення (стиску).

Замкнутий процес, у результаті якого система повертається в початковий стан, називається циклом, або круговим процесом.

Тепловою машиною називається механізм, який здатний періодично виконувати роботу. При цьому система після виконання повного циклу повертається в початковий стан.

Схема теплової машини:

Н – нагрівник; **Х** – холодильник; **РТ** – робоче тіло.

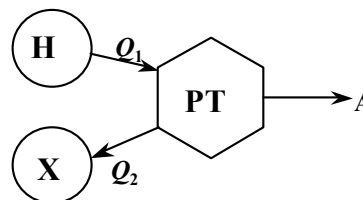


Рисунок 4.3

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$$

де **A** – робота, що виконується робочим тілом; **Q₁** – теплота, що підводиться до робочого тіла від нагрівника; **Q₂** – теплота, що забирається від нього холодильником.

ККД (**η**) виражається в процентах або у відносних одиницях, $\eta < 100\%$.

Карно довів, що максимальний ККД буде мати така тепла машина, робочий цикл якої складається із двох ізотерм та двох адіабат.

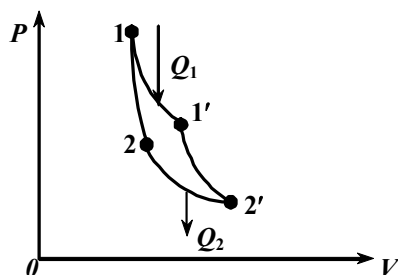


Рисунок 4.4

В **p-V**-координатах цикл Карно зображений на рис. 4.4.

Q₁ – теплота, що підводиться; **Q₂** – теплота, що відводиться від робочого тіла на ділянках ізотермічного розширення та стиску (відповідно).

Схема процесу:

1-1', 2'-2 – ізотерми.

1'-2', 2-1 – адіабати.

1-1' – ізотермічне розширення; $1-1' \rightarrow Q_1$ ($T_1 = \text{const}$); 1'-2' – адіабатне розширення (супроводжується пониженням температури);

1'-2' $\xrightarrow{Q=0} (T_1 \rightarrow T_2)$; 2'-2 – ізотермічний стиск; $2'-2 \rightarrow Q_2$ ($T_2 = \text{const}$); 2-1 – адіабатний стиск (супроводжується нагріванням); $2-1 \xrightarrow{Q=0} (T_2 \rightarrow T_1)$.

Площа криволінійного чотирикутника 1-1'-2'-2 відображає роботу, виконану робочим тілом. Вона виконана за рахунок того, що на верхній ізотермі робоче тіло забрало у нагрівника більшу кількість теплоти, ніж віддало холодильнику на нижній ізотермі.

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \text{ – для будь-якої теплової машини.}$$

$$\eta_{\text{іо}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \text{ – ККД машини, що працює за циклом Карно (ідеальної),}$$

$\eta_{\text{реал}} < \eta_{\text{ідеал}}$ (внаслідок необоротних процесів, що відбуваються в реальних машинах).

У теплових машинах внутрішня енергія нагрівника зменшується не тільки тому, що він передає теплоту холодильнику, але й тому, що виконується робота. В холодильних машинах здійснюється зворотний процес – передача теплоти від холодного тіла до гарячого. При цьому зовнішні сили здійснюють над робочим тілом (фреоном) роботу, і від холодного тіла забирається певна кількість теплоти.

Задача. Нехай ідеальна холодильна машина, що працює по зворотному циклу Карно, здійснює за один цикл роботу 37 кДж. При цьому вона забирає тепло від тіла із температурою 263 К і віддає тепло тілу з температурою 290 К. Знайти: 1) ККД циклу; 2) кількість теплоти, що віднімається у холодного тіла за один цикл; 3) кількість теплоти, що передана гарячому тілу за один цикл.

Розв'язок

$$1) \eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 0,093;$$

$$2) Q_2 = Q_1 - A = \frac{A}{\eta} - A = \frac{1 - \eta}{\eta} A = 360 \text{ кДж;}$$

$$3) Q_1 = Q_2 + A = 360 + 37 = 397 \text{ кДж.}$$

Таким чином, холодильна машина за кожний цикл передає більш гарячому тілу 397 кДж теплоти, із яких 37 кДж – за рахунок механічної роботи, а 360 кДж – від холодного тіла.

4.5 Фази. Фазові переходи. Плавлення (кристалізація), випаровування (конденсація). Кипіння. Теплота фазового переходу

Фаза – однорідна складова системи, відокремлена від інших границею розділу.

Приклади фаз: рідка, тверда, газоподібна. Так для речовини, що описується хімічною формулою H_2O , можливі фази: вода, лід, пара.

Дві фази можуть співіснувати в певному діапазоні температур і тиску в рівновазі.

Рівновага 2-х фаз може мати місце лише в певному інтервалі температур. Причому кожному значенню T відповідає цілком визначене значення P , для якого можлива рівновага. Таким чином, рівновага двох фаз зображується на діаграмі $P(T)$ у вигляді лінії (див. рис. 4.5). Ця залежність являє собою фазову діаграму. При відсутності зовнішніх впливів (у тому числі підводу зовнішньої теплоти) дві фази при сталій температурі співіснують безмежно довго.

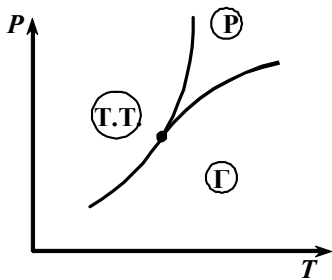


Рисунок 4.5

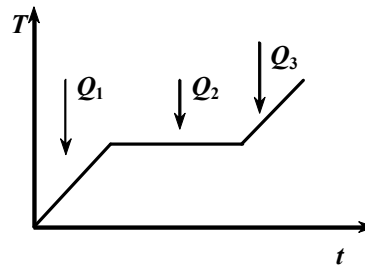


Рисунок 4.6

Три фази можуть співіснувати тільки при одній певній температурі і тиску в рівновазі. На діаграмі $P(T)$ цьому станові відповідає точка, яка називається потрійною.

Чотири фази не можуть співіснувати в рівновазі одночасно, – обов'язково буде відбуватися розпад на кілька фаз.

Перехід речовини з однієї фази в іншу, що супроводжується виділенням або поглинанням теплоти, називається фазовим переходом першого роду.

Приклади: плавлення, кристалізація, випаровування.

При протіканні фазового переходу першого роду, незважаючи на підведення теплоти (Q_2 на рис. 4.6), температура речовини залишається сталою в часі, поки він не закінчиться.

Фазові переходи другого роду відбуваються без виділення або поглинання теплоти; при цьому змінюється кристалічна ґратка або якийсь параметр (наприклад, теплоємність, електро- або теплопровідність). Процес відбувається скачком.

Фазові переходи (ФП) відбуваються в системі при підведенні певної кількості теплоти. При описі ФП пов'язують між собою p , T , V і кількість підведеної (поглинутої) теплоти.

Рівняння Клапейрона-Клаузіуса визначає нахил кривої фазової рівноваги $p(T)$.

Воно пов'язує $\frac{dp}{dT}$, кількість підведеної теплоти Q_{12} , температуру фазового переходу T і об'єм при рідкому V_2 і твердому V_1 агрегатних станах.

Для виведення формули, що пов'язує кількісно нахил кривої $p(T)$ фазової рівноваги з теплою переходу та зміною об'єму при переході, припустимо, що з деякою кількістю речовини здійснюється "вузький" цикл Карно. Ізотермічними при цьому є процеси переходу речовини із фази 2 в фазу 1 при певному тиску p і зворотний перехід із фази 1 у фазу 2 при тиску $p+dp$. Оскільки, з одного боку:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{\Delta T}{T} \rightarrow \frac{dT}{T},$$

де dT – різниця температур на обох ізотермах;

з іншого боку:

$$\eta = \frac{A}{Q}; \quad \eta = \frac{dp(V_2 - V_1)}{Q_{12}},$$

де Q_{12} - теплота переходу із фази 1 в фазу 2, значить:

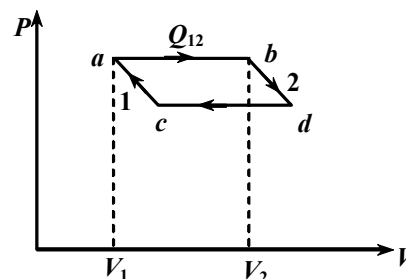


Рисунок 4.7

$$\frac{dT}{T} = \frac{dp(V_2 - V_1)}{Q_{12}}$$

або

$$\frac{dp}{dT} = \frac{Q_{12}}{(V_2 - V_1)T}.$$

Звернемо увагу на те, що похідна $\frac{dp}{dT}$ обернено пропорційна різниці об'ємів.

Оскільки зміна об'єму при випаровуванні є великою, а при плавленні – малою, то криві плавлення ідуть більш круто. Так, для зниження температури кипіння води достатньо зменшити тиск приблизно на 10^3 Па, а щоб змінити точку плавлення льоду, треба збільшити тиск на $1,3 \cdot 10^7$ Па.

В рідинах молекули всередині розташовані таким чином, що рівнодійна всіх сил дорівнює нулю. На поверхні рідин ця рівнодійна відмінна від нуля (див. рис. 4.8).

Для рідин характерним є те, що вони не мають своєї форми, а набувають форми посудини, в якій знаходяться, мають великий коефіцієнт поверхневого натягу та мало стискаються в порівнянні з газами.

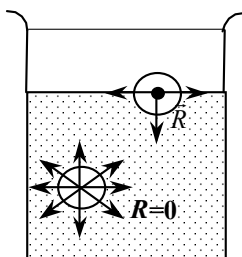


Рисунок 4.8

Молекули на поверхні рідини мають енергію, яка перевищує енергію тих, що в об'ємі. Звідси поверхневий шар рідини має більшу потенційну енергію молекул, ніж будь-який інший шар. Різниця між енергією всіх молекул поблизу поверхні тіла, і тією, що ці молекули мали б, якщо б знаходилися в середині тіла, називається поверхневою енергією.

Поверхнева енергія $U = \alpha S$, де α - коефіцієнт поверхневого натягу. Він залежить від природи і стану рідини. За загальними правилами механіки похідна від поверхневої енергії по координаті x уздовж

напрямку дії сили є силою поверхневого натягу.

$$F = -\frac{dU_{пов}}{dx} = -\alpha \frac{dS}{dx}.$$

При $S = \ell \cdot x$, $F = -\alpha \ell$, де ℓ - довжина контуру.

Сила, віднесена до одиниці довжини контуру, направлена перпендикулярно до цієї лінії, по дотичній до поверхні, називається коефіцієнтом поверхневого натягу α , $[\alpha] = \text{Н/м} = \text{Дж/м}^2$.

Специфіка поверхневого шару: крім появи поверхневого натягу є викривлення поверхні внаслідок взаємодії молекул поверхні з молекулами стінок посудини, в якій знаходиться рідина.

Викривлення поверхні рідини призводить до появи додаткового тиску Δp , оскільки при цьому рідина прагне скоротитися. Вигнуті поверхні рідини, що змочують стінки посудини, називаються менісками.

Якщо поверхня опукла, то $\Delta p > 0$ і навпаки, для вгнутої поверхні $\Delta p < 0$.

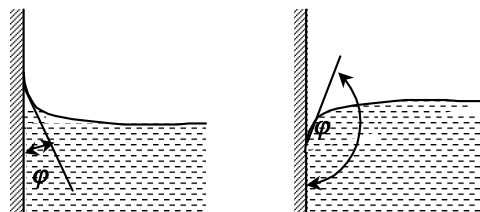


Рисунок 4.9

$$\Delta p = \alpha \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) -$$

формула Лапласа, де: α – коефіцієнт поверхневого натягу; R_1 та R_2 – радіуси кривизни поверхні в двох взаємно перпендикулярних перерізах, що проходять через цю поверхню. Для сферичної поверхні $R = const$, тому

$$\Delta p = \frac{2\alpha}{R}.$$

Задача. Яку силу треба прикласти, щоб відірвати (без зсуву) одну від другої дві змочені фотопластинки розміром 9x12 см? Вважати, що змочування є повним, товщину водяного прошарку вважати рівною 50 мкм.

Розв'язок



Рисунок 4.10

Поверхня рідини, що змочує фотопластинки, має циліндричну форму із радіусом кривизни $R=d/2$, де d – відстань між пластинками (рис. 4.10). Додатковий тиск Δp , під циліндричною вгнутою поверхнею є

від'ємним і рівним $\Delta p = \frac{\alpha}{R} = \frac{2\alpha}{d}$. У нашому випадку,

для циліндричної поверхні, $R_1=\infty$, $R_2=d/2$, Δp – надлишок зовнішнього тиску. Звідси сила, яку треба прикласти, щоб відірвати пластинки:

$$F = pS = \frac{2\alpha}{d} S = \frac{2 \cdot 0,073 \cdot 1,08 \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^{-5}} = 31,5 \text{ Н.}$$

Явище відсутності в'язкості в рідині називається надплинністю. Воно не пояснюється класичною фізикою. Спостерігається в рідкому гелії-2, який є так званою "квантовою рідиною". Із надплинністю гелію-2 пов'язане його швидке перетікання з однієї посудини в іншу, коли посудини розділені перегородкою.

Плавлення – це перехід тіл із твердого стану в рідкий. У процесі плавлення відбувається руйнування кристалічної ґратки твердого тіла.

Температура тіла при плавленні не змінюється. Вся кількість теплоти, що підводиться до твердого тіла, іде на руйнування кристалічної ґратки і роботу проти зовнішніх сил.

Кількість теплоти, що є необхідною для переходу одиниці маси твердого тіла в рідкий стан при температурі плавлення, називається питомою теплотою плавлення

$\lambda = \frac{q}{m}$, q – кількість теплоти, необхідна для розплавлення тіла масою m .

Перехід речовини із рідкого стану в твердий називається кристалізацією. Для будь-якої хімічно чистої речовини цей процес іде при сталій температурі, що дорівнює температурі плавлення: $T_{кр} = T_{пл}$.

Питома теплота кристалізації, тобто кількість теплоти, що виділяється при кристалізації одиниці маси, дорівнює питомій теплоті плавлення.

Кристалізація поглинається біля центрів, якими служать домішки, пилінки, локальні (місцеві) порушення однорідності рідини.

Кількість теплоти, що необхідна для перетворення в пару одиниці маси рідини, називається питомою теплотою пароутворення. Зворотний процес – конденсація, відбувається при тій самій температурі, що й пароутворення.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ “МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА ТА ТЕРМОДИНАМІКА”

1. Записати рівняння стану ідеального газу.
2. Які процеси в газах ви знаєте?
3. Із чого складається внутрішня енергія ідеального газу? Реального газу?
4. Що визначає число Авогадро?
5. Сформулювати перший закон термодинаміки.
6. Сформулювати другий закон термодинаміки.
7. Що називається питомою та молярною теплоємністю?
8. Намалювати графік циклу Карно.
9. Що таке к.к.д.? Записати формулу к.к.д. теплової машини, що працює за циклом Карно?
10. Що називається питомою теплотою плавлення? Питомою теплотою кипіння?
11. Що називається фазою? Приклад фази.
12. Що називається фазовим переходом. Приклад фазового переходу.

5 ЕЛЕКТРОСТАТИКА

Електростатика вивчає електростатичні поля, електричні заряди та їх взаємодію.

5.1 Закон Кулона

Основний закон електростатики був експериментально встановлений Кулоном. Він є справедливим для нерухомих точкових зарядів.

$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} e_{12},$$

де F_{12} – сила дії першого заряду на другий; q_1, q_2 – нерухомі точкові заряди; r – відстань між зарядами; $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; e_{12} – одиничний вектор, що направлений від першого заряду до другого.

Точковий заряд – це такий заряд, розмірами якого в даній задачі можна знехтувати. Прикладом можуть служити заряджені тіла, відстань між якими набагато більша від їх розмірів.

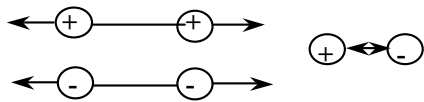


Рисунок 5.1

Кулонівські сили є центральними, тобто це сили, які діють уздовж лінії, що з'єднує центри тіл.

Приклади центральних сил:

а) $F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$ – гравітаційна;

б) $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$ – електростатична.

Одноїменні заряди відштовхуються, а різноїменні – притягуються (рис. 5.1).

5.2 Напруженість електричного поля. Потенціал, різниця потенціалів

Поле характеризується напруженістю і потенціалом.

Напруженість електростатичного поля – це силова характеристика поля.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_n}$$

Напруженість електростатичного поля дорівнює силі, яка діє на одиничний пробний заряд, поміщений в дану точку поля.

Пробним називається заряд, який не впливає на поле, в яке він уміщений, і має знак “+”.

Напруженість – векторна величина.

$$[E]=\text{В/м (СІ)}.$$

Розрахунок напруженості поля, створеного системою зарядів, здійснюється за принципом суперпозиції.

Принцип суперпозиції стверджує: напруженість поля в даній точці простору, що створена системою зарядів, дорівнює геометричній сумі напруженостей полів, що створюється кожним із зарядів у даній точці:

$$\vec{E} = \sum \vec{E}_i.$$

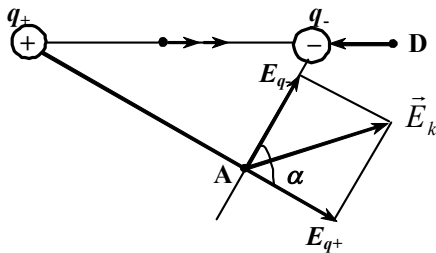


Рисунок 5.2

Звідси величина напруженості поля, створеного двома точковими зарядами в деякій точці простору (рис. 5.2), визначатиметься згідно з теоремою косинусів за формулою:

$$E = \sqrt{E_{q+}^2 + 2E_{q+}E_{q-} \cdot \cos \alpha + E_{q-}^2}.$$

Напруженість поля залежить від геометричної форми зарядженого тіла, відстані до нього і величини заряду.

$$E = \frac{k \frac{q \cdot q_n}{r^2}}{q_n} = k \frac{q}{r^2} \text{ – для точкового заряду;}$$

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \text{ – для нескінченно довгої зарядженої площини, } \sigma = \frac{\Delta q}{\Delta S} \text{ – поверхнева густина}$$

заряду, тобто величина заряду, що припадає на одиницю площі зарядженої поверхні.

Для наочності поле графічно зображають за допомогою силових ліній, дотичні до яких співпадають із напрямком вектора напруженості в даній точці поля. Вони володіють такими властивостями:

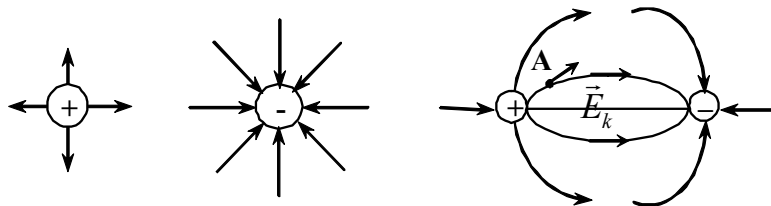


Рисунок 5.3

1. Силкові лінії починаються на позитивних і закінчуються на негативних зарядах.
2. Силкові лінії не перетинаються.
3. Густина силових ліній відповідає величині напруженості.

Вибравши масштаб, можна порівнювати напруженості полів, створених різними за величиною зарядами.

Потенціалом електричного поля називають відношення потенційної енергії заряду в полі до величини цього заряду. Це енергетична характеристика електричного поля. Тепер можна записати:

$$A_{12} = q_n (\varphi_1 - \varphi_2) = -q_n \Delta\varphi.$$

За умови, коли

$$\varphi_2 = 0 \Rightarrow \varphi_1 = \frac{A_{12}}{q_n}.$$

|| **Потенціал є скалярною величиною, що чисельно рівна роботі з переміщення одиничного пробного заряду з даної точки в безмежність.**

$$\varphi = \frac{A}{q_n}.$$

Розмірність: $[\varphi] = [\Delta\varphi] = 1 \text{ Дж/Кл} = 1 \text{ В}$.

Один вольт – це різниця потенціалів між двома точками, коли переміщення одиничного позитивного заряду супроводжується виконанням роботи 1 Дж.

Якщо поле створено системою зарядів, то потенціал у деякій точці дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів, створених кожним із зарядів у цій точці (принцип суперпозиції)

$$\varphi = \sum \varphi_i.$$

Еквіпотенціальними лініями (поверхнями) називаються лінії (поверхні) рівного потенціалу (рис. 5.4, 5.5).

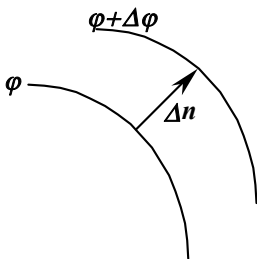


Рисунок 5.4

$$\varphi = \frac{A}{q_n} \rightarrow \varphi_1 = \frac{A_1}{q_n}, \quad \varphi_2 = \frac{A_2}{q_n}.$$

Різниця потенціалів

$$|\varphi_1 - \varphi_2| = |\Delta\varphi| = \frac{A_{12}}{q_n}.$$

Швидкість зміни величини (її зростання), що припадає на одиницю довжини, являє собою фактично градієнт цієї величини (коли зміна розглядається вздовж нормалі n).

Розглянемо переміщення деякого заряду q з положення з потенціалом φ в інше положення, де потенціал $[\varphi + \Delta\varphi]$ (рис. 5.4).

Оскільки:

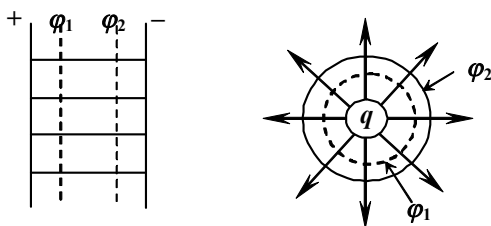


Рисунок 5.5

1. $A = q[\varphi - (\varphi + \Delta\varphi)]$ (з одного боку);
2. $A = qE \cdot \Delta n$ (з другого боку як добуток сили $q\vec{E}$ на переміщення $\Delta\vec{n}$), то
3. $E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta n}$.

У загальному, використовуючи з математики поняття градієнт, можна записати формулу, що пов'язує вектор напруженості електричного поля із потенціалом:

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi \quad \text{або} \quad \vec{E} = -\vec{\nabla} \cdot \varphi,$$

де $\vec{\nabla}$ - математичний оператор “набла”, що визначає зміну певної скалярної величини в усіх напрямках простору:

$$\vec{\nabla} = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z},$$

де \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} - одиничні вектори по осях (орти). Для напруженості:

$$\vec{E} = -\left(\vec{i} \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial \Phi}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right),$$

а відповідні складові напруженості по осях визначаються:

$$E_x = -\frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial \Phi}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial \Phi}{\partial z}.$$

Коли заряд переміщується вздовж екіпотенційної поверхні (лінії), то робота $A=0$. Це, як відомо, відповідає умові, що сила \vec{F} перпендикулярна переміщенню. Значить, вектор напруженості теж перпендикулярний до екіпотенційної лінії або поверхні в кожній точці (див. рис. 5.5).

Сили, що діють на заряд q в електростатичному полі, є консервативними, тобто, робота цих сил по замкнутому шляху дорівнює нулю:

$$A = \oint_{\ell} E d\ell = 0.$$

Поле, в якому робота не залежить від форми шляху, а залежить тільки від початкового і кінцевого положення тіла і дорівнює при русі по замкнутому шляху нулю, називається потенціальним (потенційним).

5.3 Електроємність. Конденсатори. Енергія зарядженого конденсатора

Потенціал Φ пов'язаний із зарядом провідника пропорційною залежністю

$$q_1 \sim \Phi_1; q_2 \sim \Phi_2; \dots; q_n \sim \Phi_n,$$

тобто певному наданому заряду відповідає певний потенціал провідника. Коефіцієнт пропорційності

$$C = \frac{q}{\Phi},$$

де C – ємність відокремленого провідника.

Ємність – це фізична величина, що характеризує здатність провідника накопичувати заряд і дорівнює відношенню заряду, що знаходиться на провіднику, до його потенціалу. По-іншому, ємність чисельно рівна заряду, який треба надати провіднику, щоб змінити його потенціал на одиницю. Одиницею виміру в системі СІ є: $[C] = 1 \text{ Кл/В} = 1 \text{ Ф}$.

Ємність ізолюваних провідників залежить від їх геометричних розмірів та форми провідників.

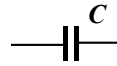
Конденсатор – це система, що складається з двох ізолюваних провідників, між якими, як правило, знаходиться діелектрик, причому поле зосереджене між провідниками.

$$C = \frac{q}{\Phi_1 - \Phi_2},$$

де Φ_1 і Φ_2 – потенціали відповідно 1 і 2 пластини.

Пластини конденсатора заряджені різнойменно, але зарядом однакової величини.

На схемах ємність позначається так:



Якщо між обкладками конденсатора є деяка кількість шарів різнорідних діелектриків, то ємність такого конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} + \dots + \frac{d_n}{\epsilon_n}},$$

де d_i , ϵ_i – товщина кожного шару i відповідна діелектрична проникність.

Конденсатори застосовують для двох основних типів фундаментальних задач:

- 1) накопичення енергії;
- 2) як елементи фільтрів та перетворення сигналів в електронних схемах.

При послідовному вмиканні конденсаторів виконується рівність:

$$\left(\frac{1}{C}\right)_{\text{посл.}} = \sum \left(\frac{1}{C}\right)_i.$$

При паралельному вмиканні (див. рис. 5.6):

$$C_{\text{пар.}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n.$$

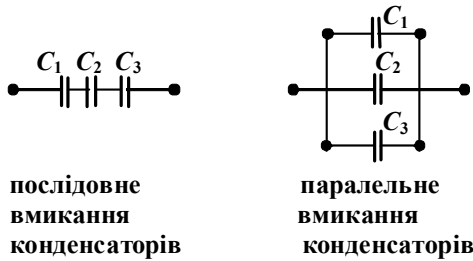


Рисунок 5.6

Відомо, що $A_{12} = q(\varphi_1 - \varphi_2)$.

При наданні провіднику з потенціалом φ заряду величиною dq виконується робота:

$$dA = -dq \cdot \varphi \quad \text{Оскільки} \quad \varphi = \frac{q}{C} \quad \rightarrow \quad dA = -\frac{1}{C} q dq.$$

Звідси, щоб зарядити провідник від 0 до q , треба виконати роботу:

$$A = \int_0^q \left(-\frac{1}{C}\right) q dq = -\frac{q^2}{2C}.$$

Енергія конденсатора при виконанні роботи A із зарядки конденсатора $W_e = -A = \frac{q^2}{2C}$.

Після підстановки $C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}$ отримаємо:

$$W_e = \frac{q^2}{2q} (\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{qU}{2} \quad \rightarrow \quad U = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Величина U в нашому випадку – це різниця потенціалів або напруга. Для електростатичного поля, коли відсутні сторонні сили:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2.$$

При розв'язуванні задач зустрічаються такі форми запису енергії конденсатора:

$$\boxed{W_e = \frac{CU^2}{2}}; \quad \boxed{W_e = \frac{qU}{2}}; \quad \boxed{W_e = \frac{q^2}{2C}}$$

Зробимо перетворення, щоб виразити енергію зарядженого конденсатора через величини, що характеризують поле між його обкладками:

$$W_e = \frac{CU^2}{2} \quad \rightarrow \quad W_e = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{2d} (\varphi_1 - \varphi_2)^2 = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{2d} E^2 d^2 = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2} V,$$

де V – об'єм, що зайнятий полем між обкладками конденсатора ($V = Sd$).

За означенням $w_e = \frac{W_e}{V}$ – об'ємна густина енергії електростатичного поля. Звідси

$$w_e = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2}.$$

Задача. Електрон влітає в поле конденсатора паралельно до пластин із швидкістю $\mathfrak{g}_0 = 1 \cdot 10^7$ м/с. Напруженість поля конденсатора $E = 1 \cdot 10^4$ В/м. Довжина конденсатора 0,05 м. Знайти величину і напрямок швидкості електрона при його вильоті із конденсатора.

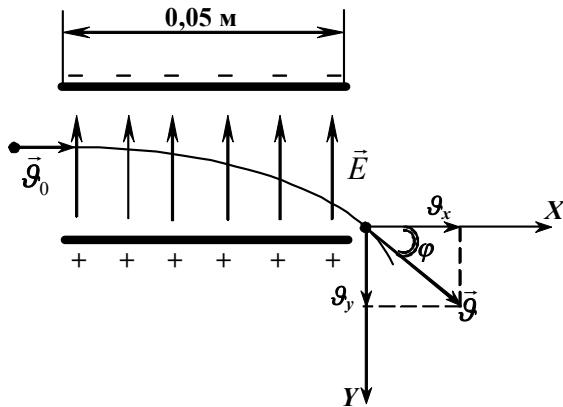


Рисунок 5.7

На рис. 5.7 показано траєкторію руху електрона в конденсаторі.

1. На електрон діє кулонівська сила $F_k = eE$ (e – заряд електрона, E – напруженість поля конденсатора), що направлена вздовж осі Y .

Крім того, на електрон діє також сила тяжіння $F_T \ll F_k$ (тому нею нехтуємо).

2. Швидкість електрона \mathfrak{g} , що направлена по дотичній до траєкторії під кутом φ до осі X , розкладемо на дві взаємно перпендикулярні складові – \mathfrak{g}_x і \mathfrak{g}_y . Одна складова $\mathfrak{g}_x = \mathfrak{g}_0$ (в даному напрямку сили на електрон не діють).

Друга складова $\mathfrak{g}_y = at$; a – прискорення, що набуває електрон у полі конденсатора; t – час прольоту електронем конденсатора. $t = \frac{l}{\mathfrak{g}_0}$, l – довжина конденсатора.

3. За другим законом Ньютона

$$F_y = eE = ma \quad \Rightarrow \quad a = \frac{eE}{m}.$$

4. Звідси складова швидкості

$$\mathfrak{g}_y = \frac{eE}{m} t = \frac{eE}{m} \cdot \frac{l}{\mathfrak{g}_0},$$

а швидкість

$$\mathfrak{g} = \sqrt{\mathfrak{g}_x^2 + \mathfrak{g}_y^2} = \sqrt{\mathfrak{g}_0^2 + \left(\frac{eE}{m} \cdot \frac{l}{\mathfrak{g}_0} \right)^2},$$

$$\mathfrak{g} \approx 1,3 \cdot 10^7 \text{ м/с.}$$

5. Із рис. 5.7 бачимо, що кут вильоту φ визначається за формулою $\varphi = \arccos \frac{\mathfrak{g}_0}{\mathfrak{g}}$, $\varphi \approx 41^\circ$.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ «ЕЛЕКТРОСТАТИКА»

1. Закон Кулона.
2. Напруженість електричного поля як силова характеристика, фізичний зміст.

3. Графічне зображення поля; принцип суперпозиції.
4. Робота сил електростатичного поля при переміщенні заряду. В чому полягає потенціальний характер електростатичного поля?
5. Потенціал як енергетична характеристика поля. Фізичний зміст та розмірність.
6. Різниця потенціалів, фізичний зміст.
7. Еквіпотенціальні поверхні та їх властивості. Зв'язок між потенціалом та напруженістю поля.
8. Теорема Гауса.
9. Електроємність провідника, одиниці вимірювання.
10. Конденсатори. Ємність плоского конденсатора. З'єднання конденсаторів та загальна ємність. Багатошаровий конденсатор.
11. Енергія конденсатора. Густина енергії електростатичного поля.

6 ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

6.1 Електричний струм. Сила струму, густина струму. Різниця потенціалів, ЕРС, напруга

Всякий впорядкований рух електричних зарядів називається електричним струмом. Це процес перенесення заряду.

В даному розділі розглянемо струм провідності.

За напрямком струму прийнято вважати напрямок руху позитивних зарядів. I – сила струму. За означенням: сила струму – це скалярна величина, яка чисельно рівна величині заряду, що переноситься через площу провідного середовища за одиницю часу:

$$I = \frac{dq}{dt}.$$

Якщо за однаковий час через площу провідного середовища переноситься така сама величина заряду, то $I = \frac{q}{t}$ є постійним струмом. Одиницею вимірювання сили струму є: $[I]=1 \text{ Кл/с}=1 \text{ А}$.

j – густина струму – це кількість заряду, що проходить через одиницю площі перерізу провідника в напрямку, перпендикулярному до швидкості носіїв, за одиницю часу; $[j]=1 \text{ А/м}^2$

$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}}.$$

Густина струму, на відміну від сили струму, – величина векторна. Можна показати, що

$$\vec{j} = \sum q_i n_i \vec{\mathfrak{G}}_i,$$

де n_i – концентрація, $\vec{\mathfrak{G}}_i$ – дрейфова швидкість певного сорту носіїв заряду, q_i – заряд частинок.

Для металів, де носіями струму є електрони,

$$\vec{j}_{мет} = en \vec{\mathfrak{G}}_{др}$$

де e – елементарний заряд, n – їх концентрація.

Швидкість частинок у даних виразах є дрейфовою, тобто тією швидкістю, яку отримує заряд в електричному полі.

Для середовища, де є різнойменні заряди, наприклад, іонізованого газу,

$$\vec{j} = q_+ n_+ \vec{\mathcal{G}}_+ + q_- n_- \vec{\mathcal{G}}_- .$$

Щоб у колі протікав електричний струм, необхідними умовами є:

- 1) наявність різниці потенціалів на кінцях провідника (тобто сторонніх сил);
- 2) наявність вільних зарядів;
- 3) замкнутість кола.

Сторонні сили – це сили некулонівського походження, які розділяють різноміненні заряди і створюють напругу на кінцях провідника (хімічні, механічні, електромагнітні, вихрові електричні – все це сторонні сили). Їх робота визначається формулою:

$$A_{стор} = \int_1^2 \vec{F}_{стор} \cdot d\vec{\ell} .$$

Звідси, після підстановки $F_{стор} = qE_{стор}$, отримаємо:

$$A_{стор} = \int_1^2 q \vec{E}_{стор} \cdot d\vec{\ell} = q \int_1^2 \vec{E}_{Iстор} \cdot d\vec{\ell} .$$

Введемо величину ε , що називається е.р.с. і характеризує залежність електричної енергії, що отримали заряди в джерелі, від внутрішньої будови джерела.

$$\varepsilon = \frac{A_{стор}}{q} = \frac{q \oint \vec{E}_{стор} \cdot d\vec{\ell}}{q} = \oint_e \vec{E}_{стор} \cdot d\vec{\ell} .$$

Звідси дамо три визначення е.р.с.:

1. Електрорушійною силою називається величина, яка чисельно рівна роботі сторонніх сил з переміщення одиничного заряду з однієї точки кола в іншу.
2. Електрорушійна сила дорівнює циркуляції вектора напруженості сторонніх сил по замкнутому контуру ℓ .
3. Електрорушійна сила визначається як різниця потенціалів на кінцях розімкнутого кола.

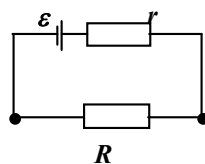
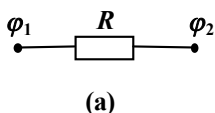
Пам'ятайте:

$$\oint \vec{E}_к \cdot d\vec{\ell} = 0 \Rightarrow \text{кулонівське поле потенційне};$$

$$\oint \vec{E}_{стор} \cdot d\vec{\ell} \neq 0 \Rightarrow \text{поле сторонніх сил – вихрове.}$$

6.2 Закон Ома (для ділянки кола, повного кола та в диференціальній формі)

Однорідною називається ділянка, в якій немає електрорушійної сили. Для неї (рис. 6.1, а) закон Ома записуємо у вигляді:



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

Для неоднорідної ділянки кола (рис. 6.1, б), при наявності е.р.с. ε_{12}

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}}{R} .$$

Тут величина $U = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}$ - спад напруги.

Якщо коло замкнуто і в

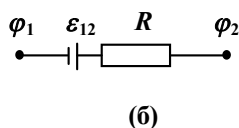


Рисунок 6.1

нього включено джерело з внутрішнім опором r та опір R (рис. 6.1, в), то

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

Ця формула виражає закон Ома в інтегральній формі.

Опір провідника $R = \rho \frac{\ell}{S}$, де ρ – питомий опір провідника; ℓ – довжина провідника; S – площа поперечного перерізу. ρ – залежить від температури та домішок і дефектів у провідниках. Для металів

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t^\circ),$$

де α – температурний коефіцієнт опору, ρ_0 – питомий опір при 0°C .

$[\alpha]=1 \text{ град}^{-1}$; $[\rho]=1 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$. Зростання опору із зростанням температури в металах пояснюється ростом амплітуди коливань іонів кристалічної ґратки металів із температурою, що призводить до збільшення розсіяння електронів на цих коливаннях.

Для однорідного провідника довжиною ℓ і перерізом S можна записати:

$$I = jS; \quad U = E\ell.$$

Тоді

$$jS = \frac{E \cdot \ell}{\rho \frac{\ell}{S}} \rightarrow j = \frac{E}{\rho} \rightarrow \gamma = \frac{1}{\rho} \rightarrow j = \gamma E,$$

де j – густина струму, γ – питома провідність – величина, обернена до питомого опору. Отримана формула

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} \text{ – закон Ома в диференціальній формі.}$$

Залежність струму від напруги називається вольтамперною характеристикою елемента. Для звичайних математичних провідників ця залежність – лінійна, оскільки виконується закон Ома.

Однак, наприклад, для вакуумних і напівпровідникових діодів ця залежність – нелінійна, тобто в цьому випадку закон Ома в широкому діапазоні залежності струм-напруга не виконується.

6.3 Закон Джоуля-Ленца

Джоуль встановив, що при проходженні по провіднику електричного струму виділяється теплота:

$$Q = IUt = \frac{U^2}{R}t = I^2Rt,$$

де I – сила струму, U – напруга на провіднику, t – час проходження струму, R – опір провідника. Це закон Джоуля-Ленца, записаний в інтегральній формі.

Звідси потужність (теплота, що виділяється за одиницю часу):

$$P = \frac{Q}{t} = IU = I^2R = (jS)^2R = j^2S^2\rho \frac{\ell}{S} = j^2\rho\ell S = j^2\rho V,$$

а $w = \frac{P}{V}$ – потужність, що виділяється в одиниці об'єму.

$$w = j^2\rho = \gamma^2 E^2 \rho = \gamma E^2.$$

Отримана формула

$$w = \gamma E^2 \text{ – закон Джоуля-Ленца в диференціальній формі.}$$

Задача. Сила струму I в провіднику змінюється з часом t за законом $I=2+6t$, де I – виражено в Амперах, t – в секундах. Яка кількість електрики проходить через поперечний переріз провідника за проміжок часу від моменту $t_1=1$ с до моменту $t_2=5$ с? При якій силі постійного струму через поперечний переріз провідника за той самий час проходить та сама кількість електрики?

1. За означенням сила струму $I = \frac{dq}{dt}$; звідси кількість електрики, що пройде через поперечний переріз провідника за проміжок часу від моменту t_1 до t_2

$$q = \int_{t_1}^{t_2} I(t)dt = \int_{t_1}^{t_2} (2 + 6t)dt = 2t + 3t^2 \Big|_{t_1}^{t_2}; \quad q=80 \text{ Кл.}$$

2. При постійному струмі виконується рівність $I = \frac{q}{t_2 - t_1}$, тому що через поперечний переріз провідника протікає однакова кількість електрики за рівні проміжки часу.

Звідси

$$I = \frac{80 \text{ Кл}}{(5-1) \text{ с}} = 16 \text{ А.}$$

Задача. В схемі, представленій на рис. 6.2, $\varepsilon_1 = 2\varepsilon$, $R_1=R_3=20$ Ом, $R_2=15$ Ом, $R_4=30$ Ом. Амперметр показує 1,5 А (струм через нього тече знизу вверх). Знайти ε_1 ,

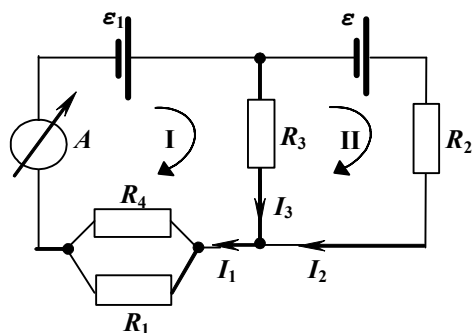


Рисунок 6.2

ε_2 , а також сили струмів I_2 та I_3 , що проходять через опори R_2 та R_3 відповідно. Опором батарей та амперметра знехтувати.

1. Опори R_1 , R_4 ввімкнені паралельно їх опір

$$R_{14} = \frac{R_1 R_4}{R_1 + R_4} = 12 \text{ Ом.}$$

2. На основі правил Кірхгофа для одного вузла та двох контурів запишемо (див. рис. 6.2) три незалежних рівняння із трьома невідомими. Врахуємо, що замість опорів R_1 , та R_4 стоїть їх еквівалент R_{14} . Обхід контурів зробимо за

годинниковою стрілкою. Тоді маємо:

$$\begin{cases} I_2 + I_3 - I_1 = 0 \\ I_3 R_3 + I_1 R_{14} = 2\varepsilon \\ I_2 R_2 - I_3 R_3 = \varepsilon \end{cases}$$

Зробимо відповідні підстановки даних із умови задачі та, відповідно, перепишемо і розв'яжемо рівняння:

$$\begin{cases} I_2 + I_3 = 1.5 \\ 20I_3 + 18 = 2\varepsilon \\ 15I_2 - 20I_3 = \varepsilon \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_3 = 1.5 - I_2 \\ \varepsilon = 10I_3 + 9 \\ 15I_2 - 30 + 20I_2 = 10 \cdot 1.5 \cdot I_2 - 10I_2 + 9 \end{cases}$$

Відповідь: $I_2=1.2$ А, $I_3=0.3$ А, $\varepsilon=12$ В.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ «ПОСТІЙНИЙ СТРУМ»

1. Електричний струм.
2. Основні величини, що характеризують електричний струм, їх фізичний зміст та розмірність.
3. Умови існування струму. Електрорушійна сила.
4. Закон Ома для ділянки та повного кола. Електричний опір, одиниці вимірювання, фізичний зміст цієї величини. З'єднання провідників, їх загальний опір.
5. Залежність опору від геометричних розмірів та від температури. Явище надпровідності.
6. Закон Ома в диференціальній формі.
7. Закон Джоуля-Ленца. Його зміст. Диференціальна форма запису.
8. Яка природа та причини наявності носіїв електричного струму у металах.
9. Поясніть механізм проходження електричного струму в металах.
10. Як пояснюється залежність електричного опору металів від температури?
11. Чи завжди виконується закон Ома?

7 ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

7.1 Взаємодія струмів. Закон Ампера, сила Лоренца

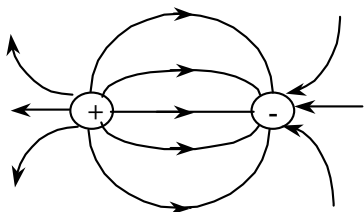


Рисунок 7.1

Магнітне поле – це вид матерії, завдяки якій передається взаємодія між рухомими електричними зарядами, що знаходяться, як правило, в провіднику і створюють струм I .

Сила взаємодії між провідниками одиничної довжини зі струмом прямо пропорційна добутку сил струмів і обернено пропорційна відстані між провідниками b .

Можна дати загальне визначення

магнітного поля:

|| Це – особливий вид матерії, що виникає навколо будь-якого електричного струму і має властивість діяти на рухомий електричний заряд.

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2I_1 I_2}{b},$$

μ_0 – магнітна стала. Якщо струм по провідниках тече в одному напрямку, вони притягуються, і навпаки.

Магнітне поле виникає внаслідок руху заряджених мікрочастинок (електронів, протонів, іонів), а також завдяки наявності у мікрочастинках власного (спінового) магнітного моменту.

Якщо струми є однаковими за величиною, то

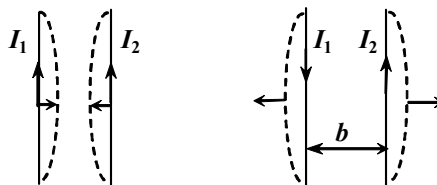


Рисунок 7.2

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2I^2}{b}.$$

Звідси:

Ампером називають таку силу струму, що протікає в кожному з двох нескінченно довгих паралельних провідників, що знаходяться у вакуумі на відстані 1 м один від одного, і викликає силу взаємодії $2 \cdot 10^{-7}$ Н, яка діє на кожен метр довжини провідника.

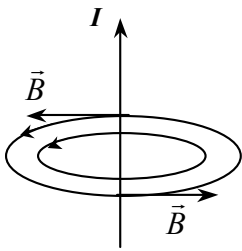


Рисунок 7.3

Силовою характеристикою магнітного поля є магнітна індукція \vec{B} . Силкові лінії магнітного поля замкнуті, що свідчить про відсутність окремих магнітних зарядів одного знака (монополів). Напрямок силових ліній магнітного поля пов'язаний з напрямком струму в провіднику і визначається правилом правого свердлика (див. рис. 7.3).

Магнітне поле, на відміну від електростатичного, є вихровим, а не потенційним.

Робота по замкнутому шляху в такому полі не дорівнює нулю.

Допоміжна характеристика магнітного поля, що не залежить від властивостей середовища, аналогічна величині \vec{D} електричного поля називається напруженістю. Формула, що пов'язує магнітну індукцію і напруженість поля \vec{H} :

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

$[B]=1$ Тл, $[H]=1$ А/м, $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м в СІ – магнітна стала, μ – це відносна магнітна проникність середовища. В діа- і парамагнетиках $\mu \sim 1$, у феромагнетиках, де сильне внутрішнє магнітне поле $\mu \gg 1$.

Із досліду випливає, що, як і для електричного поля, для магнітного справедливий принцип суперпозиції

$$\vec{B} = \sum \vec{B}_i,$$

магнітна індукція поля \vec{B} , створеного кількома рухомими зарядами (струмами) дорівнює векторній сумі полів \vec{B}_i , що породжуються кожним із цих зарядів (струмів).

Ампер встановив закон взаємодії електричного струму з магнітним полем. У векторній формі закон Ампера має вигляд:

$$d\vec{F}_A = I [d\vec{\ell} \times \vec{B}],$$

де $d\vec{F}_A$ – сила Ампера, що діє на елемент провідника в магнітному полі, I – сила струму в елементі провідника $d\vec{\ell}$ (довжиною $d\ell$), \vec{B} – магнітна індукція поля.

Сила Ампера є перпендикулярною до площини $(d\vec{\ell}, \vec{B})$ з напрямком векторного добутку або правого гвинта. Величина сили Ампера:

$$dF_A = Id\ell B \sin(\vec{d\ell} \wedge \vec{B}) = Id\ell B \sin \alpha.$$

$F=0$, якщо кут між напрямком $d\vec{\ell}$ і \vec{B} $\alpha=0$ (провідник паралельний до вектора \vec{B}), $F=F_{max}$ ($\alpha=\pi/2$)

$$dF_{max} = Id\ell B \rightarrow B = \frac{1}{I} \cdot \frac{dF_{max}}{d\ell} \text{ (провідник перпендикулярний до вектора } \vec{B} \text{)}.$$

Звідси випливає означення одиниці магнітної індукції:

$$[B] = \frac{1\text{Н}}{1\text{А}} \cdot \frac{1}{\text{м}} = 1\text{Тл (Тесла)}.$$

1 Тл – це індукція такого магнітного поля, в якому на провідник довжиною 1 м діє сила 1 Н, якщо по провіднику протікає струм в 1 А, і він є перпендикулярним до напрямку вектора магнітної індукції \vec{B} .

Сила, що діє на електричний заряд, який рухається в магнітному полі, називається силою Лоренца. Векторна форма запису сили Лоренца:

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

де q – заряд частинки, \vec{v} – швидкість частинки, \vec{B} – магнітна індукція поля. За законом Ампера:

$$F_A = IdlB \sin \alpha.$$

Перепишемо останню формулу, зробивши ряд відповідних підстановок замість густини струму, об'єму, концентрації:

$$F = jS \cdot dl \cdot B \sin \alpha \rightarrow F = qn\vec{v} \cdot Sdl \cdot B \sin \alpha = qN\vec{v}B \sin \alpha, \text{ де}$$

$$N = n \cdot dl \cdot S = n \cdot dV \text{ – кількість носіїв в об'ємі провідника } dV=dl \cdot S,$$

$$F_L = \frac{F_A}{N}.$$

$$\boxed{F_L = q\vec{v}B \sin \alpha} \text{ – величина сили Лоренца.}$$

α – кут між \vec{v} і \vec{B} .

Властивості сили Лоренца:

1. Сила Лоренца не виконує роботи, тому що вона перпендикулярна до переміщення.
2. Сила Лоренца не змінює кінетичної енергії частинки, а змінює напрямок руху частинки.
3. Дією сили Лоренца пояснюється явище електромагнітної індукції, ефект Холла, можливість керування траєкторією руху частинок.

Під дією F_L відхиляються частинки в електронно-променевих трубках, прискорювачах елементарних частинок, мас-спектрометрах. Період обертання частинки в магнітному полі не залежить від її швидкості, а від відношення її заряду до маси та магнітної індукції поля.

Задача. Протон влітає із швидкістю $v=10^3$ м/с в однорідне магнітне поле під кутом 60° до ліній індукції. Визначити радіус та крок спіральної лінії, по якій буде рухатись протон, якщо модуль індукції магнітного поля рівний $B=10^{-3}$ Тл.

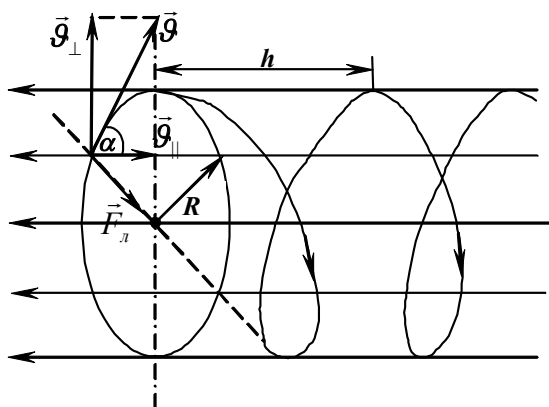


Рисунок 7.4

1. На заряджену частинку в однорідному магнітному полі діє сила Лоренца (всіма іншими силами нехтуємо внаслідок того, що їх дія в порівнянні з дією сили Лоренца мала). $\vec{F}_L = q[\vec{v} \times \vec{B}]$.

2. Під дією сили Лоренца частинки (протон) починають рухатися по гвинтвій лінії. Це видно із розкладання швидкості \vec{v} на складові \vec{v}_\perp та \vec{v}_\parallel . Модулі швидкостей: $v_\perp = v \sin \alpha$, $v_\parallel = v \cos \alpha$. У відповідності до рис. 7.4 при вказаних напрямках \vec{B} і \vec{v} сила Лоренца діє на протон перпендикулярно площі рисунка і

неперервно змінює напрямок складової \vec{v}_\perp , що зумовлює появу прискорення частинки в площині, перпендикулярній полю.

3. У результаті протон описує в цій площині коло радіуса R . $F_n = q\mathcal{G}_\perp B = q\mathcal{G}B \sin \alpha$ (з одного боку), з другого боку за другим законом Ньютона

$$F_n = \frac{m\mathcal{G}_\perp^2}{R} = \frac{m\mathcal{G}^2 \sin^2 \alpha}{R}, \text{ звідки } R = \frac{m\mathcal{G} \sin \alpha}{qB}, R \approx 9 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 9 \text{ мм.}$$

4. Уздовж силових ліній на протон ніякі сили не діють. Тому він рухається прямолінійно із постійною швидкістю $\mathcal{G}_\parallel = \mathcal{G} \cos \alpha$. Якраз наслідком накладання прямолінійного руху на коловий рух є те, що протон описує в просторі гвинтову лінію.

5. За один оберт частинка (протон) зміщується на відстань $h = \mathcal{G}_\parallel T = \mathcal{G} \cos \alpha \cdot T$, де T – період обертання протона по колу радіуса R . Він рівний довжині кола, поділений на швидкість \mathcal{G}_\perp :

$$T = \frac{2\pi R}{\mathcal{G}_\perp} = \frac{2\pi R}{\mathcal{G} \sin \alpha}.$$

Звідси h (крок спіральної лінії) після підстановки R виражається формулою:

$$h = \frac{2\pi m \mathcal{G} \cos \alpha}{qB}, h \approx 3,2 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 3,2 \text{ мм.}$$

7.2 Явище електромагнітної індукції. ЕРС електромагнітної індукції. Правило Ленца

Розглянемо контур, через який проходить змінний магнітний потік. Магнітний потік Φ визначається числом силових ліній, що пронизують дану площадку. Якщо магнітний потік рівномірно пронизує площадку і перпендикулярний до неї, то $\Phi = BS$. Якщо кут між потоком Φ , і нормаллю до площадки дорівнює α , то $\Phi = BS \cos \alpha = B_n S$. В загальному випадку, якщо потік нерівномірний, то площадка розбивається на маленькі елементи dS . Тоді потік $\Phi = \int B_n dS$. $[\Phi] = 1 \text{ Вб}$.

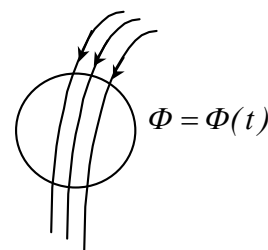


Рисунок 7.5

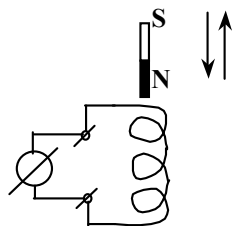
Дослідним шляхом виявлено, що при зміні магнітного потоку через поверхню, обмежену замкнутим провідником, у цьому провіднику виникає електричний струм. Струм називається індукційним струмом, а саме явище – електромагнітною індукцією.

Електрорушійна сила, яка при цьому виникає, називається електрорушійною силою (е.р.с) індукції.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

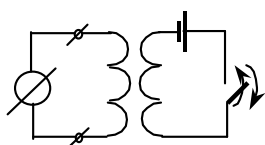
Можна сформулювати основний закон електромагнітної індукції (закон Фарадея-Максвелла):

|| Е.р.с. електромагнітної індукції в контурі чисельно рівна і протилежна за знаком швидкості зміни магнітного потоку крізь поверхню, обмежену цим контуром. Знак «-» означає: магнітне поле індукваного струму перешкоджає зміні потоку індукції зовнішнього магнітного поля (правило Ленца).

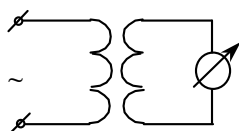


Змінювати магнітний потік можна по-різному (рис. 7.6).

зміна магнітного потоку внаслідок руху магніту



зміна магнітного потоку внаслідок замикання-розмикання контуру (котушки)



зміна магнітного потоку при протіканні змінного струму по котушці

Рисунок 7.6

Явище електромагнітної індукції пояснюється на основі закону збереження енергії і на основі електронної теорії з урахуванням дії сили Лоренца на вільні електрони, що рухаються разом із провідником.

Запишемо закон збереження енергії. Енергія, яка споживається від джерела, іде на виконання роботи та виділення тепла:

$$\mathcal{E}I dt = I^2 R dt + I \Delta \Phi \quad (\Delta \Phi \rightarrow d\Phi; \Delta t \rightarrow dt),$$

$$I = \frac{\mathcal{E} - \frac{d\Phi}{dt}}{R}; \quad \mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Тоді:

$$I = \frac{\mathcal{E} + \mathcal{E}_i}{R},$$

тобто, на струм у колі впливає складова е.р.с., яка зумовлена зміною магнітного потоку.

У провіднику є вільні носії, що рухаються з ним. На них діє сила Лоренца, яка їх зміщує, поки не встановиться рівновага сил.

$$F_l = F_k \rightarrow e \mathcal{E} B = -e E = -e \frac{\Delta \varphi_i}{l}$$

$$\Delta \varphi_i = -l \mathcal{E} B = -l \frac{dx}{dt} B = -\frac{d(BS)}{dt} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Із наведеної схеми зв'язків фізичних величин випливає, що різниця потенціалів $\Delta \varphi_i$, яка виникає на кінцях провідника, що рухається в магнітному полі саме і є е.р.с індукції:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

При наявності кількох витків

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Psi}{dt},$$

$$\Psi = N\Phi,$$

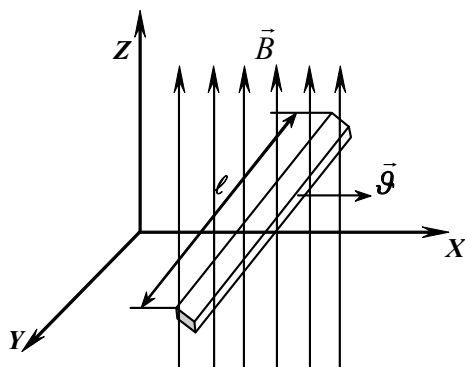


Рисунок 7.7

де N — кількість витків, Φ — магнітний потік, Ψ — потокозчеплення (загальний магнітний потік).

7.3 Самоіндукція. Е.р.с. самоіндукції. Індуктивність

Відомо, що $\boxed{B_{\sim} \sim I_{\sim}; B_{\sim} \sim i_{\sim}}$ \Rightarrow відповідність між змінним і постійним магнітним полем та струмами, що їх зумовлюють (закон Біо-Савара-Лапласа).

З другого боку, $\Phi \sim B$, тому можна записати $\Phi = LI$, де L — індуктивність

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

Індуктивність — коефіцієнт пропорційності між силою струму, що проходить у провіднику, і магнітним потоком.

$$i_{\sim} \sim \Phi_{\sim}$$

При зміні електричного струму, що проходить по провіднику, виникає електрорушійна сила самоіндукції, зумовлена цим змінним струмом.

Напрямок електрорушійної сили буде такий, щоб протидіяти зміні власного змінного струму і зміні магнітного потоку; це буде проявлятися як поява додаткового опору провідника при проходженні через нього змінного струму в порівнянні з тим, що спостерігається при проходженні такого самого по величині, але постійного струму.

$$\varepsilon_{si} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(Li)}{dt} = -L\frac{di}{dt} \quad (L = const).$$

Звідси друге означення індуктивності:

$$L = \frac{\varepsilon_{si}}{\left|\frac{di}{dt}\right|},$$

тобто індуктивність — чисельно рівна е.р.с. самоіндукції при швидкості зміни струму в провіднику 1 А/с.

Індуктивність провідника залежить від геометричних розмірів провідника і його форми.

Індуктивність провідника — аналог ємності провідника, коли мова йде про магнітне поле.

$$[L] = 1 \text{ Гн} = 1 \frac{\text{Вб}}{\text{А}} = 1 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}}$$

Самоіндукція особливо суттєво проявляється при замиканні та розмиканні електричного кола. Вона перешкоджає стрибкоподібній зміні струму, зумовлює повільне зростання струму при замиканні кола і виникнення великих напруг при його розмиканні.

7.4 Взаємоіндукція. Трансформатор

Явище взаємоіндукції полягає в появі в другому контурі електричного струму і при протіканні в першому контурі змінного електричного струму i_1 . Е.р.с. самоіндукції

$$\varepsilon_{21} = -M \frac{di_1}{dt}; \quad \varepsilon_{12} = -M \frac{di_2}{dt},$$

де M — коефіцієнт взаємоіндукції.

Трансформатор — це електричний апарат, який призначений для перетворення потужності електричного струму, збільшення або зменшення напруги у вторинному

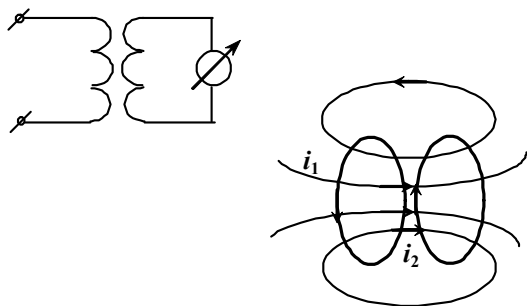


Рисунок 7.8

ному трансформаторі $k < 1$, у знижувальному $k > 1$. Сили струму в обмотках трансформатора обернено пропорційні кількості витків, а потужності в первинній та вторинній обмотках приблизно рівні.

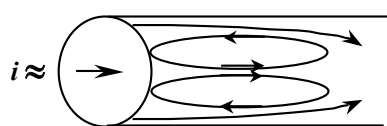


Рисунок 7.10

Явище електромагнітної індукції застосовується в таких принципових напрямках:

- 1) перетворення і передавання енергії;
- 2) технологія (для отримання високочистих матеріалів унаслідок ефекту, пов'язаного з існуванням вихрових струмів; гартування поверхні деталей при протіканні струму (внаслідок нагрівання)).

Задача. В однорідному магнітному полі, індукція якого 0,2 Тл з постійною кутовою швидкістю 20 рад/с обертається стержень довжиною 1 м. Вісь обертання проходить через кінець стержня і паралельна до силових ліній магнітного поля. Знайти е.р.с. індукції, що виникає на кінцях стержня.

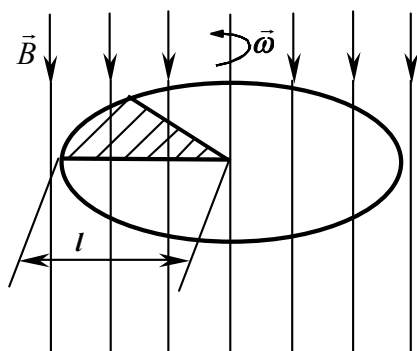


Рисунок 7.11

1. При кожному оберті стержня потік магнітної індукції, що перетинається стержнем $\Phi = BS = B\pi l^2$ (рис. 7.11).

2. Звідси

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Phi}{T} = \frac{B\pi l^2}{T} = \frac{B\pi l^2}{2\pi} \omega = \frac{B\omega l^2}{2},$$

ε_i – е.р.с. індукції, що виникає внаслідок обертання (на мікроскопічному рівні її поява пояснюється рухом вільних зарядів стержня в магнітному полі під дією сили Лоренца).

$$\varepsilon_i = \frac{0.2 \cdot 20 \cdot 1^2}{2} = 2 \text{ В.}$$

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ «ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ»

1. Що є первинним джерелом магнітних полів?

колі при зміні кількості витків другої котушки (вторинної) в порівнянні з першою. В основі його роботи лежить явище взаємодукції. При холостому ходу (коли кінці вторинної обмотки розімкнуті)

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{n_1}{n_2} = k,$$

де n_1 і n_2 – кількість витків у котушках, k – коефіцієнт трансформації. У підвищувальному трансформаторі $k < 1$, у знижувальному $k > 1$.

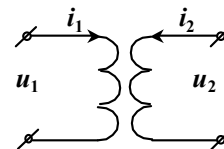


Рисунок 7.9

При протіканні змінного струму в масивному провіднику виникають так звані струми Фуко, або вихрові струми, зумовлені явищем електромагнітної індукції. Внаслідок того, що змінний струм створює змінний магнітний потік у масивному провіднику, цей магнітний потік дає великий за величиною струм, оскільки опір масивного провідника малий (рис. 7.10).

2. Як визначається сила взаємодії провідників зі струмом, від чого вона залежить?
3. Магнітне поле як особливий вид матерії. Силкові характеристики, одиниці вимірювання та їх фізичний зміст.
4. Закон Ампера, його вираз у векторній формі.
5. Сила Лоренца. Її властивості.
6. Яку форму і чому має траєкторія зарядженої частинки, що влітає в магнітне поле: а) уздовж ліній магнітної індукції; б) нормально до ліній; в) під гострим кутом?
7. У чому полягає явище електромагнітної індукції? При яких умовах воно відбувається?
8. Величина е.р.с. індукції, напрямок індукційного струму. Правило Ленца.
9. Явище взаємоіндукції та його застосування.
10. Принцип дії трансформатора, коефіцієнт трансформації.
11. Явище самоіндукції. Індуктивність, одиниці вимірювання.

8 ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛИВАННЯ. ЗМІННИЙ СТРУМ. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ

8.1 Коливний контур. Формула Томсона

Коливальним (коливним) контуром називається контур, до складу якого входить індуктивність, ємність і активний опір R . Такий контур є реальним. Контур, що складається з ємності та індуктивності, називається ідеальним контуром або контуром Томсона.

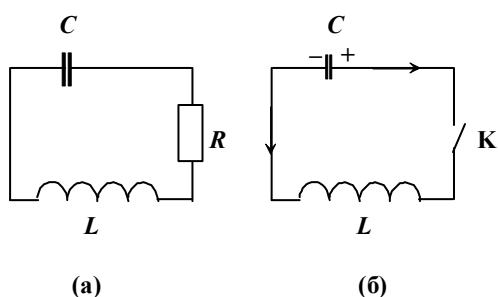


Рисунок 8.1 Коливальний контур:
а – реальний, б – ідеальний

Розглянемо процеси, що відбуваються в ідеальному контурі (рис. 8.1, б). Виберемо проміжок часу, рівний періоду T і розглянемо моменти $t=0$, $t=1/4T$, $t=1/2T$, $t=3/4T$, $t=T$.

У кожний із цих моментів уся енергія контуру зосереджена тільки в одному з елементів – ємності або індуктивності.

1. $t = 0$ $W_e = \frac{CU_m^2}{2}$ – енергія

зарядженого конденсатора в початковий момент. ($W_e = W_{e,max}$, $i=0$, $W_m=0$)

2. $t = \frac{1}{4}T$ $W_m = \frac{Li_m^2}{2}$ – енергія магнітного поля в момент часу $1/4T$, зосередженого в котушці індуктивності, зумовлена електричним струмом, конденсатор заряджений. ($I=I_m$, $W_m=W_{m,max}$, $W_e=0$)

3. Перезарядка конденсатора:

- $t = \frac{1}{2}T$ $W_e = \frac{CU_m^2}{2}$ – енергія, яку має конденсатор у момент часу $1/2T$.

4. $t = \frac{3}{4}T$ $W_m = \frac{Li_m^2}{2}$ – енергія, яку має котушка індуктивності в момент часу $3/4T$.

Конденсатор знову розряджений.

5. $t = T$ $W_e = \frac{CU_m^2}{2}$ – енергія зарядженого конденсатора через період.

Закон Ома:

$$iR = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}.$$

В нашому випадку (рис. 8.1, б) $R=0$:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{q}{C}, \quad \varepsilon_{12} = \varepsilon_{Si} = -L \frac{di}{dt}.$$

Оскільки $L \frac{di}{dt} = -\frac{q}{C}$, то підставивши $i = \frac{dq}{dt}$, одержимо:

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} = -\frac{q}{C} \quad \text{або} \quad L\ddot{q} + \frac{q}{C} = 0 -$$

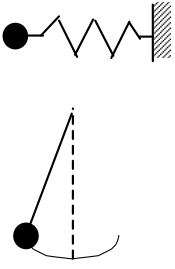
еквівалентні записи однорідного диференціального рівняння II-го порядку. Розв'язком його є гармонічна функція, як і у випадку математичного і фізичного маятника. Її вигляд

$$q = q_m \cos(\omega t + \varphi_0),$$

де q_m – амплітуда коливань заряду конденсатора, φ_0 – їх початкова фаза.

Порівняємо описаний процес із механічними коливаннями (таблиця 3).

Таблиця 3

$L\ddot{q} + \frac{q}{C} = 0$ $q = q_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$ $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ $v = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$		$m\ddot{x} + kx = 0$ $x = x_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$ $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ $v = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Період коливань ідеального контуру

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{LC} \quad \text{– це формула Томсона.}$$

8.2 Отримання змінного струму. Сила струму і напруга: миттєві, амплітудні та ефективні значення. Потужність у колі змінного струму

Змінний струм – це струм, який змінюється в часі за величиною та напрямком. Щоб був справедливим закон Ома в колі змінного струму, необхідно виконати умови квазістаціонарності.

Якщо час розповсюдження електромагнітного збурення у найвіддаленішу точку кола

$$\tau = \frac{\ell}{c} \ll T_0,$$

де ℓ – довжина кола, c – швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі (збурення), T_0 – період коливань струму, то миттєві значення сили струму в усіх перерізах кола практично однакові. Струми, що задовільняють цій умові – квазістаціонарні.

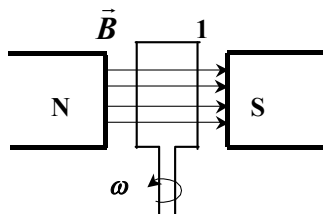


Рисунок 8.2

На рис. 8.2 показано принцип отримання змінного струму при обертанні рамки (1) в полі постійного магніту. В основі лежить явище електромагнітної індукції

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt},$$

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t,$$

(закон зміни магнітного потоку при обертанні

рамки). Звідси:

$$\varepsilon = \omega \Phi_m \sin \omega t = \varepsilon_m \sin \omega t.$$

Основними характеристиками напруги і струму, які змінюються, є амплітудне або максимальне значення, частота та діюче або ефективне значення.

Діючим або ефективним значенням змінного струму називають таке значення постійного струму, при якому на активному опорі виділяється за період така сама кількість теплоти, що і при проходженні даного змінного струму. Амперметр і вольтметр у колі змінного струму показують лише ефективні або діючі значення цих величин.

$$i_D = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$$

$$i_D = \frac{i_m}{\sqrt{2}} \text{ – гармонічний струм; } U_D = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \text{ – гармонічна напруга.}$$

Розрізняють повну, активну і реактивну потужність.

Активна потужність – це та потужність, що виділяється у вигляді теплоти на опорі R .

$$P_A = U_D i_D = \frac{i_m U_m}{2}.$$

P – середнє значення потужності, що являє практичний інтерес і яка виділяється в колі змінного струму з R, L, C , що ввімкнені послідовно (рис. 8.5)

$$P = \frac{U_m i_m}{2} \cos \varphi,$$

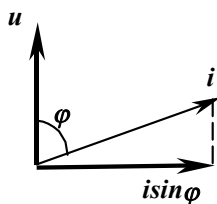


Рисунок 8.3

φ – зсув фаз між прикладеною напругою та струмом.

Потужність, що запасається на ємності та індуктивності, називається реактивною потужністю. $[Q]=\text{ВАР}$ – вольтампери реактивні.

Реактивна потужність визначається добутком ефективної напруги на реактивний струм (складова струму, що перпендикулярна напрузі) (рис. 8.3)

$$Q = U_D i \sin \varphi.$$

Повна потужність

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Формула отримується із трикутника потужностей (див. рис. 8.4).

Як бачимо, коефіцієнт корисної дії:

$$\eta = \frac{P}{S} = \cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}.$$

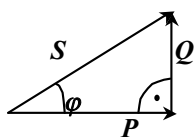


Рисунок 8.4

8.3 Активний та реактивний опори. Закон Ома для змінного струму

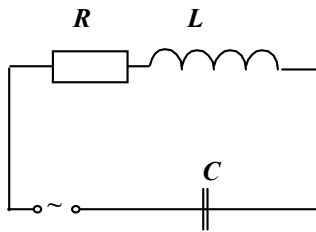


Рисунок 8.5

Подамо в коло (рис. 8.5) напругу

$$U = U_m \cos \omega t,$$

де U_m – амплітудне значення напруги.

Тоді:

$$U_L + U_C + U_R = U_m \cos \omega t.$$

Розглянемо окремо випадки, коли в коло з напругою $U = U_m \cos \omega t$ по чергово вмикаються R , L , C .

Для індуктивності:

$$U_L = L \frac{di}{dt}, \text{ або } U_m \cos \omega t = L \frac{di}{dt},$$

Звідси:

$$di = \frac{1}{L} U_m \cos \omega t dt.$$

Тепер, проінтегрувавши, отримаємо:

$$i_L = \frac{1}{L} \int U_m \cos \omega t dt = \frac{U_m}{\omega L} \sin \omega t = \frac{U_m}{\omega L} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = i_m \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Отже: **струм на індуктивності відстає від напруги на $\pi/2$ (або $T/4$).**

Амплітудне значення струму:

$$i_{mL} = \frac{U_m}{\omega L}.$$

Для ємності:

$$U_C = U_m \cos \omega t,$$

$$i_C = \frac{dq}{dt} = \frac{d(CU_m \cos \omega t)}{dt} = -\omega C U_m \sin \omega t = i_{mC} \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Отже, в цьому випадку навпаки **напруга відстає від струму по фазі на кут $\pi/2$ (або $T/4$).**

Амплітудне значення струму:

$$i_{mC} = \frac{U_m}{\frac{1}{\omega C}}.$$

За аналогією з $R = \frac{U}{i}$ отримуємо $X_L = \omega L$ – індуктивний опір, $X_C = \frac{1}{\omega C}$ – ємнісний опір.

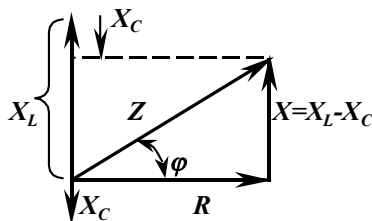


Рисунок 8.6

Для **активного** опору значення R будуть однаковими і для постійного, і для змінного струму, а тому значення напруги і струмів відповідно:

$$u = U_m \cos \omega t,$$

$$i = i_m \cos \omega t.$$

Струм і напруга збігаються за фазою.

Коли в коло ввімкнуті послідовно R , L і C , то амплітуда прикладеної напруги є векторною сумою відповідних амплітуд:

$$\vec{U}_m = \vec{u}_{mR} + \vec{u}_{mL} + \vec{u}_{mC}.$$

Виходячи із закону Ома і врахувавши, що амплітудні значення струму на цих ділянках є однаковими, можна записати, що загальний опір кола Z є векторною сумою активного та реактивних опорів. У векторному представленні окремі складові мають вигляд, показаний на рис. 8.6. Враховуючи, що $X_L = \omega L$, $X_C = \frac{1}{\omega C}$ і користуючись теоремою Піфагора, можна записати:

$$Z^2 = R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2,$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2},$$

$$i_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}} \text{ – закон Ома для амплітудних значень змінного струму.}$$

$$i = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}} \text{ – загальний закон Ома для змінного струму.}$$

Якщо зробити так, щоб $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, то в колі настає резонанс напруг, і резонансна частота $\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, а період $T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{LC}$ (формула Томсона).

Задача. В коло змінного гармонічного струму включено послідовно конденсатор ємністю $C=100$ мкФ та котушку індуктивності діаметром $D=10$ см, що складається із 1000 витків мідного дроту з перерізом $S=1$ мм². Витки щільно прилягають один до другого. Яка середня потужність виділяється на активному опорі котушки індуктивності за 1 період коливань струму в колі, якщо амплітудне значення напруги в сітці $U_m=120$ В? При якій частоті ця потужність в сітці буде максимальною? Опором підвідних дротів знехтувати. Питомий опір міді $\rho=1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом.

Розв'язок

1. Якщо в коло змінного струму ввімкнені конденсатор, ємність та резистор, то розсіювання потужності відбувається на резисторі. (В нашому випадку – це дріт, з якого намотана котушка індуктивності.) На активному опорі струм і напруга співпадають по фазі, тому

$$P = \frac{U_m I_m}{2} \cos \varphi = \left(\frac{U_m}{Z} \right)^2 \cdot \frac{R}{2}, \quad (1)$$

де Z – повний опір кола змінному струму.

2.

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}, \quad (2)$$

де ω - циклічна частота; $\omega=2\pi\nu=2\pi \cdot 50$ Гц = 314 Гц.

Реактивний опір R обмотки із мідного дроту довжиною l_0 і питомим опором ρ та поперечним перерізом S знайдемо за формулою:

$$R = \rho \frac{l_0}{S} = \frac{\pi n \rho D}{S}. \quad (3)$$

Тут n – число витків, D – середній діаметр котушки.

3. Враховуючи, що довжина котушки дорівнює добутку діаметра витка на їх кількість:

$$l = nd = 2n\sqrt{\frac{S}{\pi}}$$

і застосувавши формулу для визначення індуктивності L соленоїда, отримаємо:

$$L = \frac{\pi \mu_0 n D^2}{8} \sqrt{\frac{\pi}{S}}, \quad (4)$$

$$\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.}$$

4. Після підстановки числових значень знаходимо:

$$L \approx 9 \cdot 10^{-3} \text{ Гн, } R \approx 5,34 \text{ Ом, } Z = 5,36 \text{ Ом, } P \approx 1,34 \text{ кВт.}$$

5. Потужність, що виділяється в резисторі, буде максимальною, коли повний опір кола буде мінімальним, тобто $Z = Z_{\min} = R$. Це можливо, коли вираз, що стоїть у дужках у формулі (2) рівний 0. А це можливо при частоті $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ і

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \approx 5,6 \cdot 10^3 \text{ Гц.}$$

8.4 Електромагнітні хвилі. Їх характеристики і властивості. Шкала електромагнітних хвиль

8.4.1 Рівняння Максвелла в інтегральній формі

В електромагнетизмі ці рівняння відіграють таку ж роль, як закони Ньютона в класичній механіці.

Є інтегральні й диференціальні форми рівнянь Максвелла.

На основі рівнянь була створена теорія електромагнітних хвиль. Доведено, що природа електромагнітних хвиль і світла однакова й у вакуумі електромагнітні хвилі розповсюджуються з максимально можливою швидкістю, швидкістю світла.

Рівняння Максвелла в інтегральній формі мають вигляд:

$$1. \oint_{\ell} \vec{E}_{\ell} d\ell = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} d\vec{S}$$

$$2. \oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$$

$$3. \oint_{\ell} \vec{H}_{\ell} d\ell = \sum I$$

$$4. \oint_S \vec{D}_n dS = \sum q = \int_V \rho dV$$

Їх фізичний зміст:

1 рівняння: Змінне магнітне поле породжує змінне електричне поле, яке є вихровим (закон електромагнітної індукції).

2 рівняння: Силкові лінії магнітного поля замкнені. Це означає, що немає в природі магнітних зарядів (монополів) (теорема Гауса для магнітного поля).

3 рівняння: Змінне електричне поле породжує змінне магнітне поле, причому, крім струму провідності, в просторі існує струм зміщення, який і являє собою змінне в часі електричне поле (закон Біо-Савара-Лапласа).

4 рівняння: Потік вектора зміщення електричного поля дорівнює сумі зарядів, що знаходяться всередині об'єму, обмеженого даною поверхнею (теорема Гауса для електричного поля).

$$\left. \begin{aligned} \vec{j} &= \gamma \vec{E} \\ \vec{D} &= \epsilon \epsilon_0 \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu \mu_0 \vec{H} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Це необхідні додаткові рівняння, що пов'язують між собою} \\ \text{величини, які визначають розповсюдження електромагнітного} \\ \text{поля в середовищі в залежності від його електричних і магнітних} \\ \text{властивостей.} \end{array}$$

8.4.2 Властивості та характеристики електромагнітних хвиль. Шкала електромагнітних хвиль

Властивості електромагнітних хвиль:

1. Електромагнітні хвилі поперечні.
2. Електромагнітні хвилі розповсюджуються у вакуумі зі швидкістю світла

$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$; в середовищі електромагнітні хвилі розповсюджуються з фазовою

швидкістю $\mathcal{V}_F = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}$.

3. Електромагнітні хвилі відбиваються, заломлюються та поглинаються при переході з одного середовища в інше.
4. Інтенсивність електромагнітної хвилі зменшується при проходженні середовища за законом Бугера:

$$I = I_0 e^{-\mu(\lambda)x},$$

де I_0 – інтенсивність електромагнітної хвилі, що падає на поверхню; $\mu(\lambda)$ – коефіцієнт поглинання; x – товщина поглинаючого шару.

$$\mu(\lambda) = \frac{1}{x} \ln \frac{I_0}{I} -$$

величина, обернена до шару такої товщини, в якому інтенсивність зменшується в e разів; $[\mu] = \text{м}^{-1}$. Залежить від довжини хвилі.

5. Електромагнітні хвилі не відхиляються в електричному і магнітному полях.

Густина енергії електромагнітного поля w складається із густини енергії електричного поля і густини енергії магнітного поля:

$w_{ен} = w_e + w_m$ - густина енергії електромагнітного поля,

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

Густина потоку енергії j – це кількість енергії, що переноситься через одиничну площадку за одиницю часу в напрямку, перпендикулярному до площадки.

За означенням для будь-якої хвилі:

$j = w \cdot \mathcal{V}$, де $\mathcal{V} = c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ – для електромагнітної хвилі

$S = w \cdot c$ – густина потоку електромагнітного поля, тому оскільки:

$$\varepsilon\varepsilon_0 E^2 = \mu\mu_0 H^2,$$

$S = EH$, або у векторній формі:

$\vec{S} = [\vec{E} \times \vec{H}]$ - вектор густини потоку енергії електромагнітного поля (вектор

Пойнтінга). Напрямок вектора \vec{S} співпадає з напрямком перенесенням енергії.

До електромагнітних хвиль відносяться радіохвилі, інфрачервоні, світло, ультрафіолетові, рентгенівські, гама-хвилі (див. рис. 8.7). У принципі можна створювати хвилі будь-якої частоти (довжини хвилі), якщо вдасться знайти відповідний спосіб збуджувати коливальний рух електричних зарядів необхідної частоти. Для частот вище мікрохвильового діапазону використовується випромінювання атомних систем. Випромінювання гама-променів здійснюється атомними ядрами.

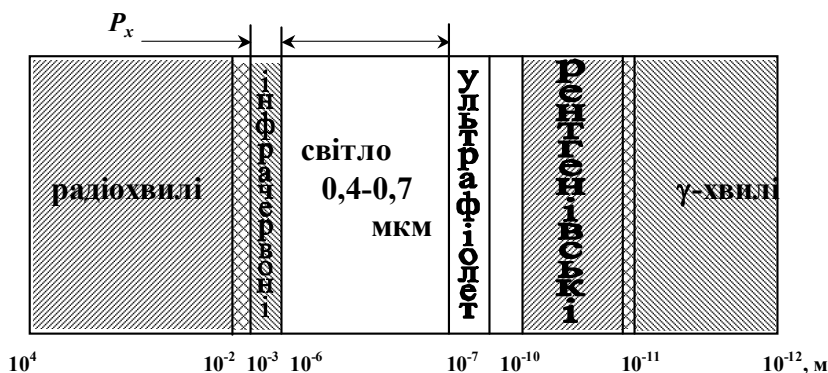


Рисунок 8.7

Базові напрямки застосування електромагнітних хвиль:

- 1) передавання і приймання інформації, при якій не треба дротів, у тому числі Internet;
- 2) новітні технології;
- 3) керування виробничими процесами, медицина і біологія;
- 4) радіолокація.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ «ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛИВАННЯ. ЗМІННИЙ СТРУМ. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ»

1. Які процеси відбуваються у коливному контурі? Перетворення енергії в контурі. Формула Томсона.
2. Яка різниця між реальним та ідеальним коливним контуром?
3. Який струм називається змінним та які його характеристики? Умова квазістаціонарності.
4. Активні та реактивні опори і потужності. Повна потужність змінного струму, його к.к.д.
5. Повний опір R , L , C -ланки для змінного струму при послідовному з'єднанні.
6. Закон Ома для змінного струму.
7. Що можна сказати про зміщення по фазі між струмом і напругою на активному та реактивному опорах?
8. Що називається електромагнітною хвилею? Її властивості.
9. Густина енергії електромагнітної хвилі та густина потоку. Вектор Пойнтінга.
10. Шкала електромагнітних хвиль та їх застосування.

9 ЕЛЕМЕНТИ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ТА ХВИЛЬОВОЇ ОПТИКИ

9.1 Предмет оптики. Дуалізм світла. Закони геометричної оптики

Оптика – це розділ фізики, що вивчає світлові явища, процеси розповсюдження світла, взаємодію світла з речовиною та взаємодію світлових потоків між собою.

Оптика поділяється на геометричну, хвильову і квантову.

Дуалізм світла полягає в тому, що воно проявляє себе в одних явищах як потік електромагнітних хвиль, а в інших – як потік частинок – фотонів.

Як хвиля світло себе проявляє в явищах інтерференції, дифракції, поляризації, дисперсії.

Як частинка – у фотоефекті, явищах поглинання та випромінювання, які спостерігаються в спектрах газів, а також в ефекті Комптона, рентгенівському випромінюванні.

З одного боку світло – електромагнітна хвиля, довжиною $\lambda \sim 0,4-0,76$ мкм (мікрон). З другого – це фотони, – особливі частинки, які не мають маси спокою

$$m_{\phi} = \frac{\hbar\omega}{c^2},$$

мають енергію

$$\varepsilon = \hbar\omega \quad (\hbar = \frac{h}{2\pi}),$$

де $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка; і імпульс

$$p_{\phi} = \frac{\hbar\omega}{c}.$$

Якщо $\lambda \rightarrow 0$, то розповсюдження світла можна розглядати на основі геометричної (променевої) оптики, вважаючи, що світло розповсюджується вздовж деяких ліній (променів).

Закони геометричної оптики:

1. Енергія світла розповсюджується в однорідному середовищі вздовж прямих ліній, які називаються променями. При перетині промені не збурюють один одного.
2. При падінні на границю двох середовищ, падаючий, відбитий і заломлений промені та перпендикуляр до межі поділу двох середовищ, поставлений у точці падіння променя, лежать в одній площині. Причому, кут падіння дорівнює куту відбивання $i=i'$ (рис. 9.1).
3. Відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення є сталою величиною для даної довжини хвилі й дорівнює відношенню фазової швидкості світла в першому середовищі до фазової швидкості світла в другому середовищі:

$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = n_{12}$ – відносний показник заломлення другого середовища відносно першого;

$\frac{\sin i}{\sin r} = n = \frac{c}{v}$ – абсолютний показник заломлення (показник заломлення відносно вакууму);

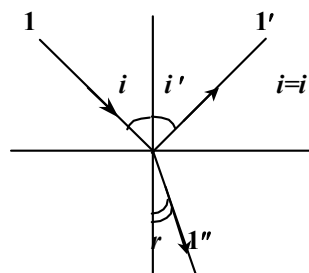


Рисунок 9.1

$n \approx \sqrt{\varepsilon}$, де ε – діелектрична проникність середовища.

Оптично гущішим називається середовище з більшим абсолютним показником заломлення. Якщо $n_2 > n_1$ ($n_2 > n_1$), то друге середовище оптично більш густе, ніж перше.

Як бачимо з рис. 9.2, при переході світла із оптично більш густого середовища в оптично менш густе промінь віддаляється від нормалі до поверхні розділу середовищ. При деякому куті падіння i_{zp} кут заломлення r дорівнює $\pi/2$. Цей кут називається граничним і визначається за формулою:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_{12} \quad \rightarrow \quad \boxed{\sin i_{\text{граничне}} = n_{12}}$$

Відносно повітря, коли $n_{12} = 1/n$ $\sin i_{zp} = \frac{1}{n}$.

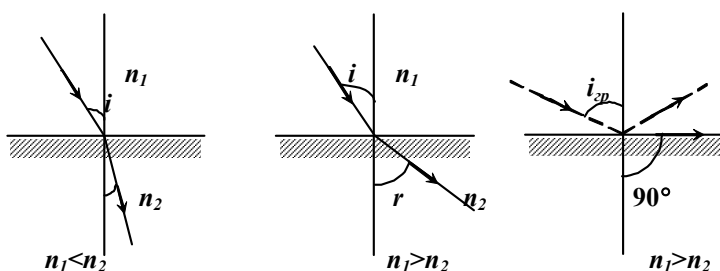


Рисунок 9.2

При кутах падіння від i_{zp} до $\pi/2$ світлова хвиля проникає в друге середовище на відстань $\sim \lambda$ і повертається в перше середовище. Це – явище повного внутрішнього відбивання.

Геометрична різниця ходу – це відстань між двома точками з координатами ℓ_1 і ℓ_2 :

$$\Delta \ell = \ell_2 - \ell_1.$$

Оптична різниця ходу в однорідному середовищі

$$\Delta L = n \Delta \ell = n(\ell_2 - \ell_1).$$

Світло переміщається в середовищі таким чином, щоб час розповсюдження був найменшим (принцип Ферма). Введення оптичної різниці ходу враховує неоднаковість швидкостей світла в різних середовищах і дозволяє в оптичних розрахунках користуватися законами геометрії.

9.2 Інтерференція, дифракція та поляризація. Їх застосування

9.2.1 Інтерференція

Інтерференція – явище накладання когерентних хвиль, при якому відбувається їх взаємне підсилення в одних точках простору й послаблення в інших.

Когерентними називаються хвилі, що мають однакову частоту і сталий у часі зсув по фазі. Якщо вони задані рівняннями:

$$E_1 = E_{m_1} \cos \omega t,$$

$$E_2 = E_{m_2} \cos(\omega t + \varphi_2),$$

то різниця фаз $\Delta \varphi = \varphi_2$ і для когерентних хвиль $\Delta \varphi(t) = \text{const}$ – сталий в часі зсув по фазі. В реальних випадках накладання хвиль різниця фаз $\Delta \varphi$ завжди змінюється з часом. Когерентність зберігається, коли час спостереження перевищує час, протягом

якого $\Delta\varphi$ помітно змінюється. Для того, щоб від довільного джерела S отримати за схемою рис. 9.3 інтерференційну картину, необхідно досягти часової і просторової когерентності, яка є найвищою у лазері.

Світло розповсюджується у вигляді цугів. Цуг – відрізок хвилі (послідовність горбів і впадин). $L \sim 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-8} \sim 3$ м – довжина цугу ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с, $\tau_{\text{цугу}} \sim 10^{-8}$ с).

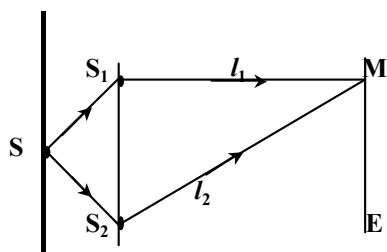


Рисунок 9.3

Метод отримання когерентного випромінювання від двох щілин показано на рис. 9.3.

E – екран, M – точка спостереження.

Загальними умовами для інтерференційних схем є:

$$\Delta = n(l_2 - l_1) = m\lambda \quad \text{– умова максимуму,}$$

$$\Delta = (2m + 1)\frac{\lambda}{2} \quad \text{– умова мінімуму, } m \text{ – ціле число.}$$

9.2.2 Дифракція

Дифракція пов'язана із взаємодією світлових хвиль при їх розповсюдженні в середовищі з різко виявленими неоднорідностями.

Дифракційні явища проявляються у відхиленні світла від прямолінійного поширення при їх розповсюдженні в неоднорідному середовищі або можна сказати, що:

Дифракція - явище огинання хвилями країв перешкод і відхилення від прямолінійного поширення.

Дифракція в залежності від відстані між джерелом, перешкодою і точкою спостереження поділяється на дифракцію Фраунгофера і дифракцію Френеля.

Дифракція від джерела, що знаходиться далеко від перешкоди, буде дифракцією Фраунгофера. В цьому випадку промені – паралельні, а фронт хвилі є плоским. Дифракційна картина утворюється паралельними дифрагованими променями. Практично це спостерігається, якщо невелике за розмірами джерело світла поставити у фокус лінзи.

В інших випадках розглядають дифракцію Френеля.

Розглянемо спочатку дифракцію на щілині від джерела, що створює паралельний пучок. Світло збирається лінзою, у фокальній площині якої розміщений екран. Розділимо щілину на ряд вузьких паралельних смуг однакової товщини. Кожна смужка – джерело вторинних хвиль, які мають однакові початкові фази, оскільки фронт хвилі – паралельний. Амплітуди всіх елементарних хвиль будуть рівними, оскільки смужки однакові.

1. Паралельний пучок дифрагованих променів, перпендикулярний до площини щілини, збереться в точці P_0 . Усі промені прийдуть в однаковій фазі і підсилять один одного. В цій точці розміститься центральний максимум.
2. Промені, нахилені вправо під кутом φ , прийдуть у точку P_φ з різницею фаз $\Delta = a \sin \varphi$, де a – ширина щілини.
3. Якщо різниця ходу $\Delta = \lambda$, то різниця фаз між крайніми променями - 2π , а, значить, між першим і середнім променями – π , тобто промені знаходяться в

протифазі і загасять один одного. Так само буде з другою половиною щілини. Значить, перший мінімум освітленості буде при $\sin \varphi = \pm \frac{\lambda}{a}$, інші мінімуми будуть для інших значень $\Delta = \pm k\lambda$, де k – ціле число 1, 2, 3... Збільшуючи φ , отримуємо максимуми інтенсивності. Але якщо центральний максимум має інтенсивність I_0 , то перші бічні – $0,05I_0$. Наступні – ще меншу.

Дифракційною ґраткою називається сукупність великої кількості однакових щілин, розділених між собою однаковими проміжками.

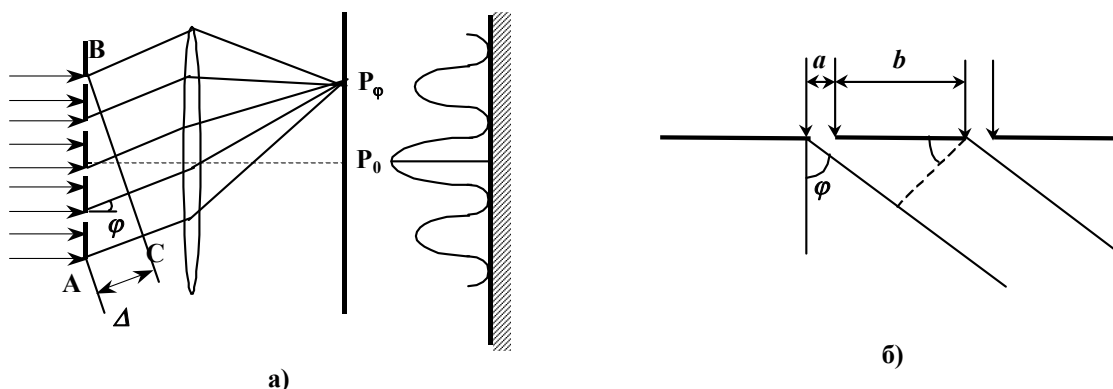


Рисунок 9.4

Із рис. 9.4 а, б бачимо, що різниця ходу від сусідніх щілин:

$$\Delta = (a + b) \sin \varphi = d \sin \varphi,$$

і для максимуму:

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

d – стала дифракційної ґратки, φ – кут дифракції, k – порядок максимуму ($k=0,1,2,3\dots$), λ – довжина хвилі. Це – умова спостереження головних максимумів.

$$d = \frac{1}{N_0},$$

де N_0 – число щілин на одиницю довжини ґратки. Між головними максимумами розміщені $N-2$ вторинних слабких, де N – число всіх щілин у ґратці.

При падінні білого світла на дифракційну ґратку спостерігається розкладання світла на спектр у відповідності до довжини хвиль. Отриманий спектр називається дифракційним.

На відміну від дисперсійного спектра, що спостерігається при попаданні білого світла на призму, в дифракційному спектрі кут відхилення тим більший, чим більшою є довжина хвилі.

9.2.3 Поляризація

Поляризованим називається світло, в якому коливання вектора напруженості \vec{E} певним чином упорядковані.

Плоскополяризованим називається світло, в якому вектор напруженості \vec{E} коливається в одній площині.

Крім плоскої поляризації, розрізняють поляризацію по колу і поляризацію по еліпсу.

Для отримання поляризованого світла використовуються:

1. Стопи Столетова, тобто системи, що складаються з кількох відбиваючих поверхонь (набір скляних пластин).
2. Природні поляризатори, які працюють на явищі подвійного променезаломлення.
3. Поляризатори, які працюють на явищі подвійного променезаломлення, що виникає внаслідок дії зовнішніх факторів і супроводжується виникненням анізотропії в середовищі.
4. Джерела вимушеного, когерентного (лазерного) випромінювання.

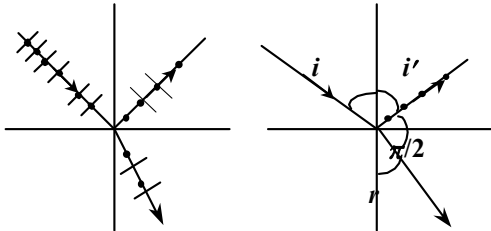


Рисунок 9.5

Внаслідок взаємодії з речовиною відбите і заломлене світло частково або повністю поляризується. При падінні під певним кутом (кут Брюстера), коли $i' + r = \pi/2$ – відбитий промінь повністю поляризований.

При цьому із законів геометричної оптики після відповідних підстановок отримаємо:

$$\boxed{\operatorname{tgi} = n} \text{ – це закон Брюстера.}$$

На рис. 9.5 показано, що всі коливання вектора напруженості E відбитого променя перпендикулярні до площини рисунка, коли $i' + r = \pi/2$.

10 КВАНТОВА ОПТИКА

10.1 Закони теплового випромінювання. Пірометрія

10.1.1 Рівноважність теплового випромінювання

Теплове випромінювання – це рівноважне випромінювання, що здійснюється за рахунок внутрішньої енергії тіла. Рівноважність теплового випромінювання означає, що кількість енергії, яку поглинає тіло при заданій температурі, дорівнює кількості енергії, яку воно випромінює. Рівноважність випромінювання означає, що розподіл енергії між тілом і випромінюванням є незмінним для кожної довжини хвилі. Теплове випромінювання має місце при будь-якій температурі. При невисоких температурах випромінюються практично лише інфрачервоні хвилі. Наприклад, максимум випромінювання при $+17^\circ\text{C}$ припадає на 10 мкм, а при 2617°C – на 1 мкм, що теж відноситься до інфрачервоного діапазону.

Крім теплового випромінювання при даній температурі T , є ще один вид випромінювання, надлишкового над тепловим з тривалістю понад 10^{-10} с, що значно перевищує період світлових хвиль. Воно називається люмінесценцією.

Нерівноважне випромінювання, до якого відноситься люмінесценція, здійснюється за рахунок зовнішнього джерела збудження і припиняється при “вимкненні” цього джерела.

Розрізняють люмінесценцію за типом джерела збудження:

- хемілюмінесценція;
- радіолюмінесценція;
- катодоліумінесценція;
- біолюмінесценція.

Явище люмінесценції описується законом Стокса.

Із закону збереження енергії:

$$h\nu_3 = h\nu_n + W_m,$$

частота люмінесцентного випромінювання

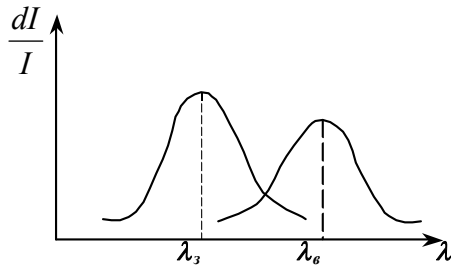


Рисунок 10.1

$$\nu_l = \nu_s - \frac{W_m}{h},$$

де ν_s – частота збуджуючого люмінесцентного випромінювання, W_m – втрата енергії на теплові процеси, що супроводжують люмінесценцію.

Застосування люмінесценції:

- 1) перетворення спектра світлового випромінювання;
- 2) індикатори;
- 3) екрани;
- 4) перетворювачі світлової енергії в інші види енергії;
- 5) елементи зв'язку.

В ізольованій системі між поглинанням і

випромінюванням існує рівновага.

10.1.2 Характеристики теплового випромінювання

Характеристиками теплового випромінювання є світність (R_T), випромінювальна здатність ($r_{\omega,T}$), поглинальна здатність ($a_{\omega,T}$).

Світність – це кількість енергії, що випромінюється одиницею площі тіла за одиницю часу в усіх напрямках і на всіх частотах.

Випромінювальна здатність – це кількість енергії, що випромінюється в одиничному інтервалі частот при заданій температурі за одиницю часу з одиниці площі тіла:

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\omega,T} d\omega.$$

Поглиняльна здатність – це безрозмірна величина, яка визначається відношенням густини потоку випромінювання, що був поглинутий тілом, до величини потоку випромінювання, що на нього падає:

$$a_{\omega,T} = \frac{d\Phi_{\omega}^{погл}}{d\Phi_{\omega}^{пад}}.$$

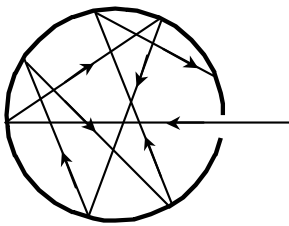


Рисунок 10.2

Тіло, яке поглинає всю енергію, що на нього падає, називається абсолютно чорним тілом ($a_{\omega,T}=1$). У природі немає абсолютно чорних тіл, усі вони є сірими і вважаються абсолютно чорними умовно.

На рис. 10.2 – приклад абсолютно чорного тіла. Це – майже замкнута порожнина із малим отвором. Випромінювання, що попадає в порожнину, багаторазово відбивається від стінки і поглинається порожниною практично повністю. В

оптичному діапазоні хвиль абсолютно чорним тілом можна вважати сажу.

10.1.3 Закони теплового випромінювання. Оптична пірометрія

Закон Кірхгофа:

Відношення випромінювальної здатності до поглинальної залежить тільки від частоти і температури.

$$\left(\frac{r_{\omega,T}}{a_{\omega,T}}\right)_I = \left(\frac{r_{\omega,T}}{a_{\omega,T}}\right)_{II} = f(\omega, T) - \text{формула, що виражає закон Кірхгофа.}$$

$f(\omega, T) = r_{\omega, T}$ – для абсолютно чорного тіла.

10.1.4 Закон Стефана-Больцмана

Світність абсолютно чорного тіла пропорційна четвертій степені абсолютної температури.

$R_T = \sigma T^4$ - формула, що виражає закон.

σ - стала Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$.

10.1.5 Закон зміщення Віна

Довжина хвилі, на яку припадає максимум випромінювання, обернено пропорційна абсолютній температурі:

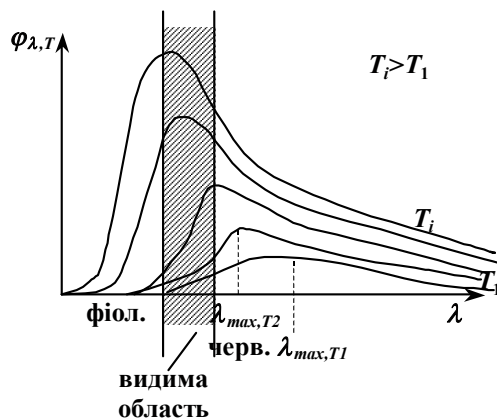


Рисунок 10.3

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} - \text{формула закону зміщення.}$$

Експериментальне значення константи $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$.

$\varphi_{\lambda, T}$ – випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла, що характеризує спектральний склад рівноважного випромінювання як функцію довжини хвилі і температури.

Характер кривих розподілу випромінювальної здатності по довжинах хвиль залежно від температури тіла проілюстровано на рис. 10.3.

10.1.6 Оптична пірометрія та її застосування

Пірометри – це прилади для вимірювання температури або енергії, що випромінюється тілом. Побудовані на законах теплового випромінювання.

Пірометри розрізняють оптичні і колірні, в залежності від того, які закони теплового випромінювання використано в їх конструкції.

Пірометри застосовують для вимірювання відносно високих температур ($T > 1000^\circ\text{C}$), позаяк вони не потребують контакту з тілом, температура якого вимірюється, а також самосвітних тіл, віддалених від спостерігача (наприклад, зір).

10.2 Фотоелектричні явища

10.2.1 Гіпотеза Планка. Кванти світла. Формула Планка для розподілу енергії по частотах (довжинах хвиль)

Для пояснення кривої розподілу випромінювання енергії по частотах (довжинах хвиль) Планк запропонував гіпотезу, згідно з якою тіло випромінює і поглинає енергію певними порціями, або квантами.

$$\varepsilon = \hbar\omega = h\nu,$$

h – стала Планка (квант дії), її розмірність співпадає з розмірністю моменту імпульсу; $h=6,62\cdot 10^{-34}$ Дж·с.

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}.$$

Формула Планка, записана для випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла як функції частоти, має вигляд:

$$f(\omega, T) = \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1},$$

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

Як функція довжини хвилі характеристика спектрального складу

$$\varphi(\lambda, T) = k f(\omega, T),$$

$$\text{де } k = \frac{2\pi c}{\lambda^2}.$$

10.2.2 Фотони

Ейнштейн висунув гіпотезу, згідно з якою світло не тільки поглинається або випромінюється, але й розповсюджується у вигляді особливих частинок – фотонів. Як уже зазначалось:

1. $\varepsilon_\phi = \hbar\omega = h\nu$.

2. Імпульс фотона $p_\phi = \frac{h\nu}{c} = \frac{\hbar\omega}{c} = \hbar K$, де K – хвильове число, $K = \frac{2\pi c}{\lambda}$.

3. Фотони мають масу, яка визначається як:

$$m_\phi = \frac{\hbar\omega}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2};$$

маса спокою фотона дорівнює нулю.

Крім того:

4. Тиск фотонів дорівнює об'ємній густині енергії, що несе світло $p=w$.

5. Фотони – це частинки з цілочисельним спіном, що відносяться до класу бозонів, тобто описуються статистикою Бозе-Ейнштейна.

6. Фотони не мають електричного заряду, не відхиляються в електричному і магнітному полях.

Завдяки значній відмінності за властивостями від інших елементарних частинок фотони виділені в окремий клас елементарних частинок.

10.2.3 Фотоефект, закони та застосування

Одним із явищ, яке може бути пояснене на основі представлення світла у вигляді частинок або корпускул, що називаються **фотонами** – є явище фотоефекту.

Фотоефектом називається явище виривання електронів з атомів під дією світла.

Якщо електрони залишаються в об'ємі речовини, то при цьому збільшується концентрація носіїв, зменшується опір. Такий **фотоефект називається внутрішнім**.

Якщо ж електрони вилітають за межі речовини, то **фотоефект буде зовнішнім**, при цьому електрони, що вирвалися із матеріалу під дією прикладеного електричного поля, можуть утворити електричний струм у колі.

Схема дослідження фотоефекту показана на рис. 10.4, а вольт-амперна характеристика вакуумного фотоелемента – на рис. 10.5.

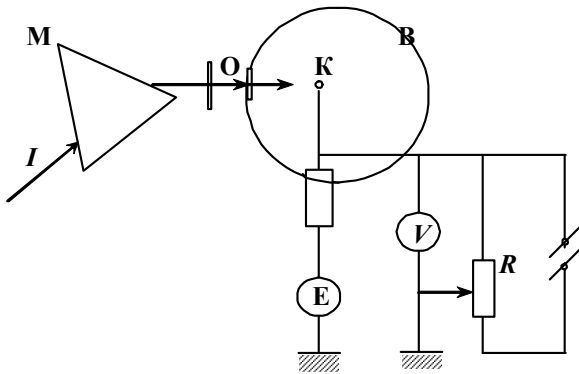


Рисунок 10.4

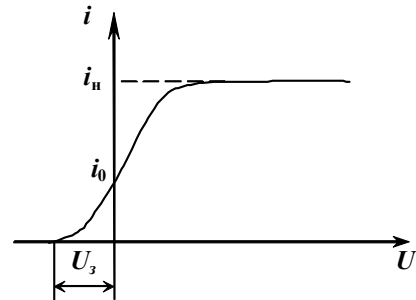


Рисунок 10.5

Закони фотоефекту:

Струм насичення пропорційний світловому потоку: $i_n = \gamma\Phi$, (рис. 10.5).

Існує червона межа фотоефекту, тобто така мінімальна частота світла, при якій ще можливий фотоефект: $\omega_r = \frac{A_e}{\hbar}$, де A_e – робота виходу електрона.

Максимальна швидкість фотоелектронів не залежить від інтенсивності світла, а залежить тільки від його частоти.

Ейнштейн запропонував формулу фотоефекту, яку ще називають законом збереження енергії для фотоефекту:

$$\hbar\omega = A + \frac{m\mathcal{G}_m^2}{2}.$$

Енергія фотона цілком засвоюється електроном і йде на подолання роботи виходу з матеріалу і надання електроном кінетичної енергії.

Як бачимо з рис. 6.5, навіть при напрузі $U=0$ може існувати невеликий струм, пов'язаний із тим, що деякі електрони мають можливість долетіти від катода до анода.

За запідною напругою (U_3) визначають величину кінетичної енергії електронів при фотоефекті (див. рис. 6.4):

$$eU_3 = \frac{m\mathcal{G}_m^2}{2} \rightarrow U_3 = \frac{m\mathcal{G}_m^2}{2e}.$$

Запідна напруга (або затримуючий потенціал) – це така напруга, при якій ні один вирваний під дією фотоефекту електрон не долітає від катода до анода.

Характеристиками фотоелементів служать також їх інтегральна та спектральна чутливості до світлового потоку.

Інтегральною чутливістю фотоелемента називається його чутливість до білого світла, тобто набору всіх довжин хвиль видимого діапазону.

Спектральною чутливістю називається чутливість до монохроматичного світла, тобто світла певної довжини хвилі.

Фотодіоди – це прилади (вакуумні або твердотільні), які служать джерелами електричного струму.

Фоторезистори – це твердотільні прилади, в яких під дією світла збільшується провідність.

Твердотільні фотодіоди відрізняються від твердотільних резисторів тим, що в них є р-п-перехід.

Наявність р-п-переходу призводить до розділення пар носіїв, що виникають під дією світла, і утворення різниці потенціалів.

Задача. Ультрафіолетові промені з довжиною хвилі $\lambda_1=0,3$ мкм, падаючи на катод фотоелемента викликають потік фотоелектронів зі швидкістю $\mathfrak{V}_1=10^6$ м/с. Світлом якої довжини треба опромінювати фотоелемент, щоб кінетична енергія фотоелектронів E_k стала рівною $4 \cdot 10^{-19}$ Дж?

1. Згідно з формулою Ейнштейна для фотоэффекту можна записати:

$$h\nu_1 = A + \frac{1}{2}m\mathfrak{V}_1^2 \quad \text{і} \quad h\nu_2 = A + E_k.$$

2. Віднявши від другого рівняння перше і зробивши підстановку $\lambda=c/\nu$, матимемо:

$$\frac{hc}{\lambda_2} - \frac{hc}{\lambda_1} = E_k - \frac{1}{2}m\mathfrak{V}_1^2$$

(c – швидкість світла у вакуумі).

3. Звідси шукана довжина світла

$$\lambda_2 = \frac{hc}{\frac{hc}{\lambda_1} + E_k - \frac{1}{2}m\mathfrak{V}_1^2} \approx 3,3 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

Задача. Чутливість сітківки ока до жовтого світла ($\lambda=0,6$ мкм) становить $W=3,3 \cdot 10^{-18}$ Вт. Скільки фотонів щосекунди повинно поглинатися сітківкою, щоб створювалося відчуття сприймання світла?

1. Потужність випромінювання буде дорівнювати енергії фотонів, що поглинатимуться сітківкою за 1 с. Енергія фотонів буде дорівнювати кількості фотонів, що поглинуті, помноженій на енергію фотона. Звідси

$$W = \frac{E}{t} = \frac{nh\nu}{t} = \frac{nhc}{\lambda t} \quad (\text{де } t=1 \text{ с}).$$

2. Звідси

$$n = \frac{W\lambda t}{hc} \approx 10 \text{ 1/с.}$$

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ «КВАНТОВА ОПТИКА»

1. Яка природа теплового випромінювання?
2. Що таке випромінювальна здатність?
3. Що таке поглинальна здатність?

4. Що таке абсолютно чорне тіло? Чому рівна поглинальна та випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла?
5. Сформулюйте закон Кірхгофа для теплового випромінювання. Який висновок випливає з нього?
6. Сформулюйте закон Стефана-Больцмана.
7. Про що говорить закон зміщення Віна?
8. Оптична пірометрія.
9. Що таке фотоефект?
10. Види фотоефекту, їх суть. Який вигляд має ВАХ зовнішнього фотоефекту і що таке затримуючий потенціал?
11. Формула Ейнштейна для фотоефекту, її фізичний зміст.
12. Закони фотоефекту.
13. Що таке внутрішній фотоефект?
14. Яку природу світла підтверджує явище фотоефекту?

11 ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ПОГЛИНАННЯ СВІТЛА АТОМАМИ. ЛАЗЕРИ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

11.1 Формула Бальмера. Постулати Бора

Розрізняють три види спектрів:

1. Лінійчатий – характерний для атомів, що не взаємодіють між собою (як правило, у газах).
2. Смугастий – характерний для рідин.
3. Суцільний – характерний для твердих тіл.

Суцільність спектра випромінювання пояснюється значною концентрацією атомів у твердому тілі в порівнянні з газом. Спектр атомів складається із серій ліній; у кожній серії частота лінії має певне значення, яке може бути визначене для атома водню за формулою:

$$\omega = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \text{ – узагальнена формула Бальмера.}$$

Формула Бальмера описує тільки спектри атомів водню. Спектри інших атомів описуються складнішими залежностями.

$R=2,07 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$ – стала Рідберга; $[R]=\text{с}^{-1}$, n і m – певні числа ($n=1,2,3,4\dots$; $m=2,3,4\dots$), які відповідають номерам енергетичних рівнів.

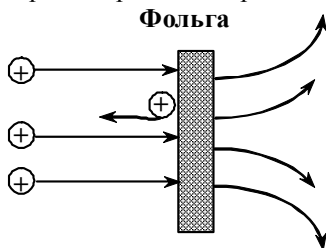


Рисунок 11.1

На рис. 11.1 схематично зображено дослід Резерфорда з бомбардування фольги α -частинками і їх розсіювання, що проводився з метою встановлення будови атома. Виявилось, що деякі із них при цьому повертаються навіть на 180° . Це показує існування малої за розмірами і великої за масою позитивно зарядженої частинки (ядра), навколо якої, за моделлю Резерфорда, обертаються від'ємно заряджені електрони*.

Модель атома Резерфорда мала два основних недоліки:

1. Якщо вважати, що система електрони-ядро нерухома, то вона повинна бути нестабільною.
2. Якщо ж вважати, що електрони обертаються навколо ядра, то вони повинні падати на ядро внаслідок руху з прискоренням, тому, що мають випромінювати при цьому енергію.

* Заряд атомного ядра $z|e|$ за абсолютною величиною рівний сумарному заряду всіх електронів, атом електронейтральний. z – порядковий номер елемента в періодичній таблиці, e – заряд електрона.

В обох випадках атоми не можуть існувати за законами класичної фізики.

Згідно з моделлю атома Бора стабільність атомів, спектри атомів і процеси випромінювання можна пояснити, якщо користуватися **такими постулатами**:

1. Існують стаціонарні орбіти, тобто такі орбіти в атомах, перебуваючи на яких електрон не випромінює енергії, причому, момент імпульсу електрона на стаціонарній орбіті: $L = m \mathfrak{v}_n r_n = n\hbar$ ($n=1, 2, 3\dots$), \mathfrak{v}_n – швидкість електрона на орбіті

$$\text{з радіусом } r_n, \hbar = \frac{h}{2\pi}.$$

2. Електрон випромінює енергію при переході з однієї стаціонарної орбіти на іншу, при цьому частота переходу визначається відношенням:

$$\omega_{nm} = \frac{E_m - E_n}{\hbar},$$

де E_m – енергія m -го рівня, E_n – енергія n -го рівня.

11.2 Лазери

Лазерне випромінювання відрізняється:

- 1) монохроматичністю ($\lambda \approx const$, $\Delta\lambda \rightarrow 0$);
- 2) когерентністю (див. п. 9.2.1);
- 3) високою інтенсивністю (див. п. 3.3.3).

Для отримання лазерного випромінювання необхідно забезпечити:

1. Інверсню заселеність рівнів, тобто таку, при якій на більш високому енергетичному рівні буде більше атомів, ніж на нижчому (рис. 11.2).
2. Забезпечити підсилення світла при його проходженні в середовищі, тобто умови, при яких коефіцієнт поглинання $\mu < 0$.

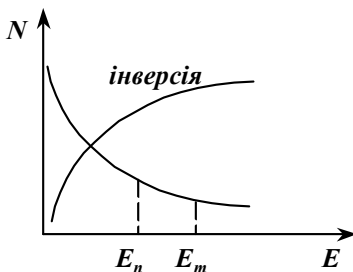


Рисунок 11.2

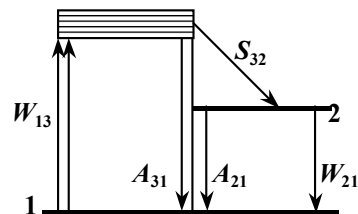


Рисунок 11.3

Інверсія заселеності досягається, якщо в системі існує принаймі три рівні, один з яких метастабільний.

Метастабільним називається рівень енергії, на якому атом може перебувати в збудженому стані $\tau_m \sim 10^{-3}$ с. На звичайному рівні цей час дорівнює $\sim 10^{-8}$ с, тобто в 100 тис. разів менше.

Схему 3-х рівневого лазера на рубіні зображено на рис. 11.3. Система рівнів створюється іонами Cr^{+++} . Збудження іонів (накачка) створюється ксеноновою імпульсною лампою. При цьому здійснюються переходи іонів W_{13} – із першого рівня на третій, $\tau_3 \sim 10^{-8}$ с. За цей час деякі іони спонтанно (самовільно) здійснюють переходи A_{31} . Однак більшість іонів спонтанно переходить на метастабільний рівень 2 (переходи S_{32}). При достатньо великій інтенсивності накачки число іонів на рівні 2 стає більшим, ніж на рівні 1. Створюється інверсна заселеність рівнів. Спонтанний перехід A_{21} може викликати вимушений перехід W_{21} і появу фотонів. Це швидко перетворюється в каскад фотонів, який розвивається завдяки багаторазовому відбиванню від торців рубінового стержня. Коли пучок стає достатньо інтенсивним, частина його виходить через напівпрозорий торець.

11.3 Фізико-технічні принципи побудови оптичних квантових генераторів. Блок-схема ОКГ. Застосування ОКГ

В основі будови лазерів лежать знання класичної фізики з одного боку - теорії електромагнетизму, оптики, геометричної і хвильової, електроніки, з другого – термодинаміки, квантової механіки, фізики твердого тіла, НВЧ техніки.

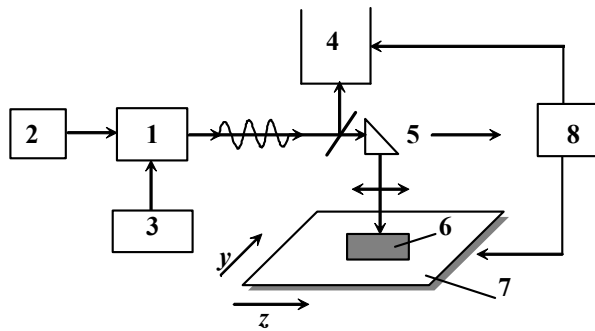


Рисунок 11.4

Блок-схема лазерної установки зображена на рис. 11.4:

1. Оптичний випромінювач.
2. Блок накопичення енергії (блок накачки).
3. Блок живлення.
4. Система індикації параметрів лазерного випромінювання.
5. Система керування лазерним променем.
6. Об'єкт, що обробляється лазерним променем.
7. Двокоординатний стіл.
8. Блок керування, система

програмного керування двокоординатним столом.

Основна частина лазера – випромінювач.

Випромінювач складається з:

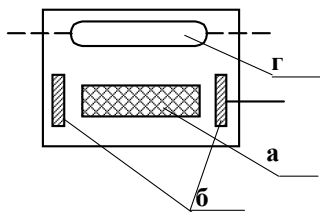


Рисунок 11.5

- а) активного елемента;
- б) дзеркал-резонаторів;
- в) оптичних затворів (для скорочення тривалості імпульсу);
- г) ламп накачки або інших засобів збудження активного елемента (активної речовини).

Активний елемент, в якому генерується лазерне випромінювання і за яким класифікується лазер може бути твердим (неодим, рубін), рідким (розчини рідкоземельних елементів – ціаніни, бензоати, радоміни), газоподібним (гелій-неон, CO₂, N₂, Ar).

Основні параметри, за якими оцінюється лазерне випромінювання, - це енергія випромінювання (E), тривалість імпульсу (τ_i), довжина хвилі (λ), густина падаючої енергії (Q) і густина потоку (q).

$$Q = \frac{E}{S}$$

$$q = \frac{Q}{\tau_i}$$

Дзеркала потрібні для забезпечення генерації лазерного випромінювання. Створюється оптичний резонатор, що складається з двох дзеркал - повністю непрозорого, що відбиває випромінювання, і напівпрозорого.

Для накачки, тобто збудження атомів активного середовища, використовують електричний розряд, оптичне випромінювання світлового джерела (спеціальні лампи, якийсь інший лазер), потік електронів і навіть ядерний вибух.

Блок накачки включає, крім джерела, що забезпечує переведення атомів у збуджений стан, систему, яка керує енергією, що підводиться до оптичного випромінювача, за допомогою високочастотного імпульсу.

Коефіцієнт корисної дії твердотільних лазерів менше 0,5%. Найбільший ККД мають напівпровідникові лазери – до 35% в даний час при потужності до 10⁷ Вт.

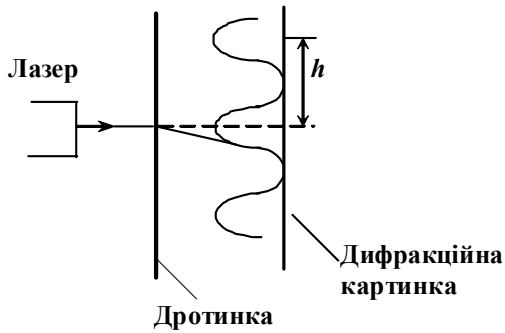


Рисунок 11.6

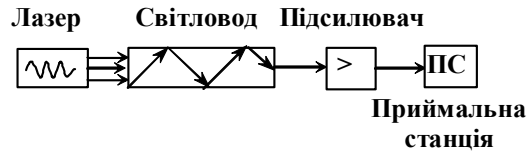


Рисунок 11.7

Блок живлення лазера складається з трансформатора, випрямляча і конденсаторної батареї.

Крім медицини, біології, технології (зварювання, термообробка, ударно-хвильова обробка), лазери можна використати, наприклад, для безконтактного вимірювання тонких об'єктів (рис. 11.6), лазерного зв'язку (рис. 11.7), у термоядерному синтезі, голографії (запис та відтворення інформації за допомогою лазерного променя).

12 ХВИЛЬОВІ ВЛАСТИВОСТІ ЧАСТИНОК. ЕЛЕКТРОННИЙ МІКРОСКОП

Відомо, що для світла характерні хвильові й корпускулярні властивості. Причому,

$$\varepsilon_{\phi} = \hbar\omega = h \frac{c}{\lambda} \text{ – енергія фотона,}$$

$$p_{\phi} = \frac{\hbar\omega}{c} = \frac{h}{\lambda} \text{ – його імпульс.}$$

В 1924 р., намагаючись знайти пояснення постульованим Бором умовам квантування атомних орбіт, де Бройль висунув ідею, що дуалізм властивий не тільки світловим явищам. Він запропонував гіпотезу, згідно з якою мікрочастинки – це особливі об'єкти, які мають хвильові властивості, причому, мікрочастинка переміщується в просторі, проявляючи себе як хвиля, довжина якої:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m\mathfrak{v}},$$

де h – стала Планка, p – імпульс частинки. Це – формула де Бройля.

Експериментальним підтвердженням даної гіпотези були досліди Девісона і Джермера з відбивання електронів від фольги та досліди Тартаковського і Томсона з дифракції електронів на фользі.

Відповідно рис. 12.1, а і 12.1, б.

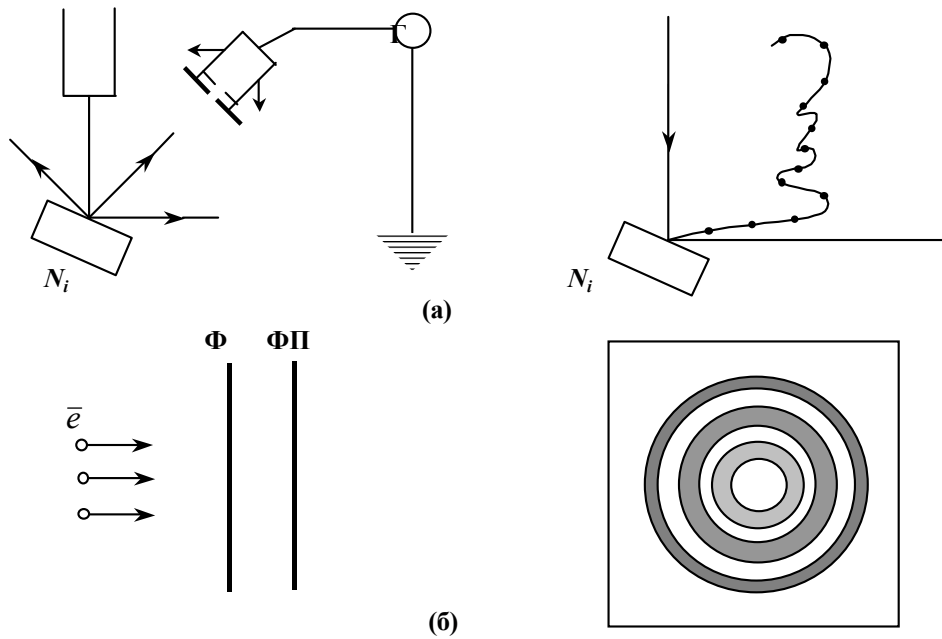


Рисунок 12.1

У досліджах Девісона-Джермера (1927) відбиті від поверхні монокристалу моноенергетичні електрони вловлювалися циліндричним електродом. Виявилось, що розсіювання електронів залежить від кута відбивання і має максимум при напрузі, що відповідає довжині хвилі, яка обчислена за формулою де Бройля. Томсон (і незалежно Тартаковський) отримали дифракційну картину від електронів, аналогічну отриманій на рентгенограмі від X -променів.

Хвильові властивості електронів і інших мікрочастинок враховуються і застосовуються в електронних мікроскопах, тунельних приладах (приладах, що працюють на тунельному ефекті), в ядерній фізиці при аналізі ядерних реакцій.

Цікавий результат дало порівняння гіпотези де Бройля і теорії атома водню Бора. За другим постулатом Бора момент імпульсу електрона, що рухається по одній із стаціонарних орбіт в атомі:

$$m\mathfrak{G}r_n = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar.$$

Звідси $2\pi r_n = n \frac{h}{m\mathfrak{G}}$. Однак за де Бройлем:

$$\frac{h}{m\mathfrak{G}} = \lambda.$$

Отже, довжина стаціонарної орбіти:

$$2\pi r_n = n\lambda.$$

Це обґрунтовує постулат Бора про стаціонарні орбіти:

|| Стаціонарними є такі стани електронів у атомі, коли на довжині їхньої орбіти вкладається ціле число дебройлівських довжин хвиль.

13 ПРОВІДНІСТЬ МЕТАЛІВ, ДІЕЛЕКТРИКІВ, НАПІВПРОВІДНИКІВ. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ

13.1 Зони в твердих тілах

При зближенні атомів дискретні енергетичні рівні окремих електронів розщеплюються, зміщуються й утворюють зони, в яких електрони можуть переміщатись у залежності від ступеня заповненості цих зон.

Причиною розщеплення енергетичних рівнів електронів є їх взаємодія з електричним полем кристалічної ґратки.

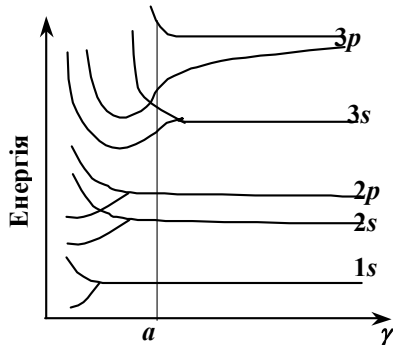


Рисунок 13.1

В першу чергу розщеплюються енергетичні рівні електронів, що знаходяться далеко від ядра, тобто валентних електронів (див. рис. 13.1). У залежності від характеру розщеплення рівнів та ступеня заповнення зон тверді тіла поділяються на метали, діелектрики і напівпровідники.

За характером заповнення зон електронами всі тіла можна поділити на дві великі групи. До першої групи відносяться метали. У них: 1) над повністю заповненою зоною розташована зона, частково заповнена. Даний випадок реалізується, коли атомний рівень, із якого утворена зона, заповнений частково, наприклад, як у лужних металів, або 2) зони – пуста (заповнена частково) і повністю заповнена – перекриваються, як у лужноземельних елементів.

До другої групи відносяться тіла, у яких над цілком заповненою валентною зоною 1 знаходиться пуста зона 2 – зона заборонених значень енергії, шириною ΔE (звідки і назва – заборонена зона). По ширині цієї зони тіла другої групи поділяються на діелектрики і напівпровідники (рис. 13.2).



Рисунок 13.2. 1 – валентна зона; 2 – заборонена зона; 3 – зона провідності

В діелектриках валентна зона повністю заповнена електронами, а пуста зона провідності відокремлена від неї забороненою зоною шириною ΔE більше 3 еВ.

У напівпровідниках $\Delta E \leq 3$ еВ.

При температурі $T > 0$ К електрони з великою ймовірністю отримують достатню енергію, щоб перейти в пусту зону. Якщо ширина забороненої зони є малою, то це легко здійснюється під дією теплоти або радіації.

13.2 Власна і домішкова провідність напівпровідників. Дірки та електрони. Донори та акцептори

Розрізняють власну і домішкову провідність напівпровідників. Напівпровідники високого ступеня очистки (власні напівпровідники) в області не дуже низьких температур мають електричну провідність, зумовлену власними носіями – електронами і дірками. Домішкові напівпровідники мають так звану домішкову провідність, що виникає внаслідок іонізації домішкових атомів, що також зумовлює появу носіїв.

При абсолютному нулю (див. рис. 13.3, а) валентна зона I буде повністю заповнена електронами, а зона провідності, що знаходиться на відстані ΔE_0 (ширина забороненої зони), буде пустою. Тому, як і діелектрик, при абсолютному нулю власний напівпровідник має нульову провідність.

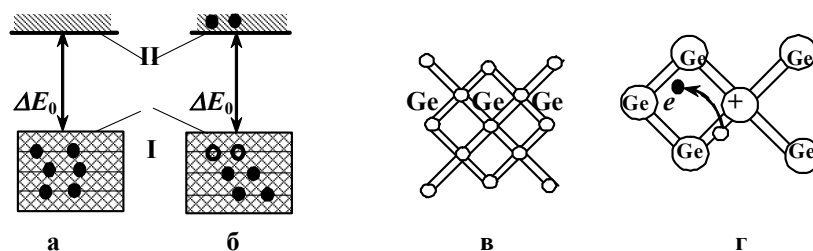


Рисунок 13.3

Розподіл електронів по рівнях валентної зони і зони провідності II описується функцією Фермі-Дірака. Рівні зони провідності лежать на “хвості” цієї кривої розподілу. Тому ймовірність їх заповнення $f(E) \sim e^{-\frac{AE}{2kT}}$. Зонній структурі рис. 13.3,а відповідає рис. 13.3,в для елемента IV групи – Ge (або Si), у якого кожний атом пов’язаний з чотирма сусідами ковалентними зв’язками. Їх розрив відповідає появі в зоні провідності електронів, а у валентній зоні – дірки (рис. 13.3, б, г).

При переході електронів з валентної зони в зону провідності, в валентній зоні утворюється вакантне місце, яке називається діркою.

Дірка має знак (+), а величину заряду $e=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Дірка – фіктивна частинка. Її струм еквівалентний сумарній силі струму всіх електронів валентної зони, яка має один вакантний стан.

Домішки, введені в кристал, які віддають електрони в зону провідності, називаються донорами.

Домішки, які забирають електрони з валентної зони і тим створюють дірки, називаються акцепторами.

Як правило, донори мають більшу кількість валентних електронів, ніж основні атоми кристала, а акцептори – навпаки.

На рис. 13.4,а умовно зображена кристалічна гратка Ge з домішкою 5-ти валентного As і відповідна енергетична схема з домішковим рівнем. V-й валентний електрон легко відщеплюється від атома As за рахунок теплової енергії і стає вільним електроном. У даному випадку, на відміну від випадку власної провідності, утворення вільного електрона не супроводжується розривом ковалентних зв’язків. Маємо провідність n-типу (донорну). На рис. 13.4,б показано випадок, коли Ge легований домішкою III-ої групи (In). Один із зв’язків – неукомплектований, і являє собою місце, здатне захоплювати електрон. При переході електрона на це місце із сусідньої пари виникає дірка, яка переміщається по кристалу. Енергетична схема із акцепторним рівнем показана справа. На відміну від донорних рівнів, розташованих ближче до дна зони провідності (ЗП), акцепторні, що впливають на електронні властивості, як правило, ближче розташовані до “стелі” валентної зони (ВЗ).

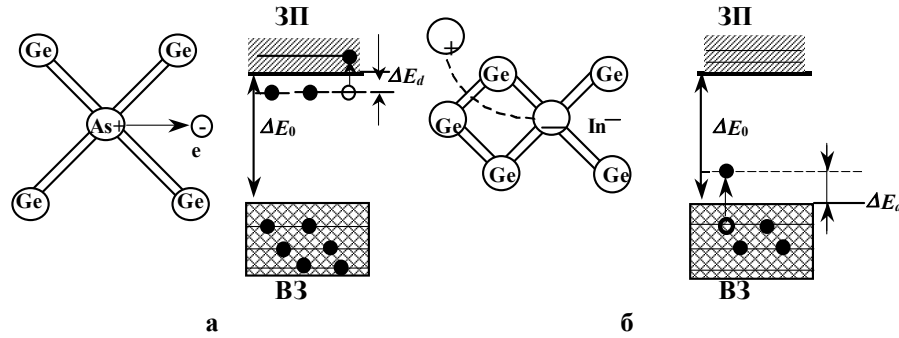


Рисунок 13.4

Власна провідність характеризується тим, що одночасно з'являються два типи носіїв (пара) – електрони і дірки в однакових кількостях, а при домішковій – тільки один тип.

$$\gamma_{вл} = e(\mu_n n + \mu_p p),$$

де μ_n – рухомість електронів, n – концентрація електронів, μ_p – рухомість дірок.

$\gamma_p = e\mu_p p_A$ - акцепторна провідність,

$\gamma_n = e\mu_n n_D$ - донорна провідність.

При високих температурах провідність напівпровідників складається з домішкової і власної провідності.

З підвищенням температури збільшується ймовірність переходу електронів у зону провідності з валентної зони, значить, їх концентрація в зоні провідності. Провідність $\gamma \sim n$ (концентрація), звідси

$$\gamma = \gamma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}.$$

13.3 Температурна залежність провідності напівпровідників

Із збільшенням температури провідність напівпровідників збільшується, на відміну від металів.

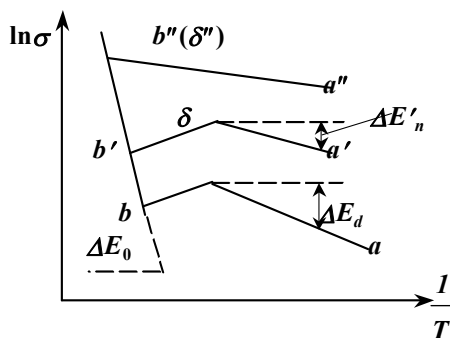


Рисунок 13.5

Існує 3 ділянки на температурній залежності провідності напівпровідників. На рис. 13.5 побудована залежність натурального логарифма провідності від $(1/T)$. $1/T$ із зростагям x зменшується. Для провідника n-типу:

1. При низьких температурах в міру підвищення температури збільшується кількість носіїв унаслідок переходу електронів у зону провідності з донорних рівнів. Це – ділянка домішкової провідності.

2. Насичення відповідає такому стану, при якому всі домішки іонізовані, тобто всі електрони донорного напівпровідника перейшли в зону провідності з донорного рівня, а акцепторного – аналогічно – на акцепторний рівень із валентної зони.

При цьому ще не достатньо енергії для переходу електронів із валентної зони в зону провідності. На цій ділянці температурний хід провідності подібний до температурного ходу провідності металів.

3. Третя ділянка відповідає області власної провідності. При цьому електрони з валентної зони переходять у зону провідності і провідність забезпечується носіями двох типів: електронами і дірками.

За залежністю $\ln \gamma \left(\frac{1}{T} \right)$ можна знайти ширину забороненої зони ΔE_0 напівпровідника та енергію домішкових рівнів.

13.4 Р-п-перехід. Напівпровідникові діоди та транзистори

Р-п-перехід - це область, збіднена вільними носіями, утворена при контакті напівпровідників р- та n-типу, коли внаслідок дифузії з n-типу електрони, де їх багато, переходять у напівпровідник р-типу, а дірки з напівпровідника р-типу переходять у напівпровідник n-типу.

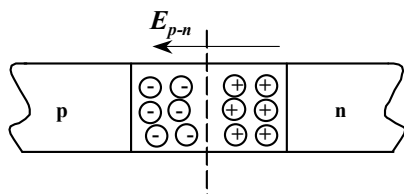


Рисунок 13.6

Концентрація дірок у р-області на шість порядків вища від їх концентрації в n-області; так само концентрація електронів в n-області на шість порядків вища від їх концентрації в р-області. Така різниця в концентраціях і викликає відповідно дифузійні потоки частинок. При цьому n-область, із якої дифундували електрони, заряджається позитивно, а р-область, із якої дифундували дірки, заряджається негативно. В приконтактному шарі n-області з'являється нерухомий позитивний об'ємний заряд іонізованих атомів донорної домішки, а в приконтактному шарі р-області - нерухомий негативний об'ємний заряд акцепторної домішки (рис. 13.6). При дифузії у зустрічних напрямках через приграничний шар дірки і електрони рекомбінують між собою, тому область р-п-переходу і є збідненою носіями, а, значить, має великий опір.

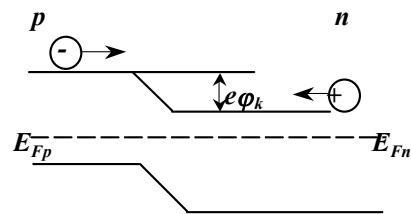


Рисунок 13.7

При наявності р-п-переходу виникає електричне поле з потенціальним бар'єром ϕ_k , яке припиняє процес руху нових дірок із р-області в n-область і нових електронів з n-області в р-область.

Як бачимо з рис. 13.7, з утворенням бар'єра, зони в області р-п-переходу

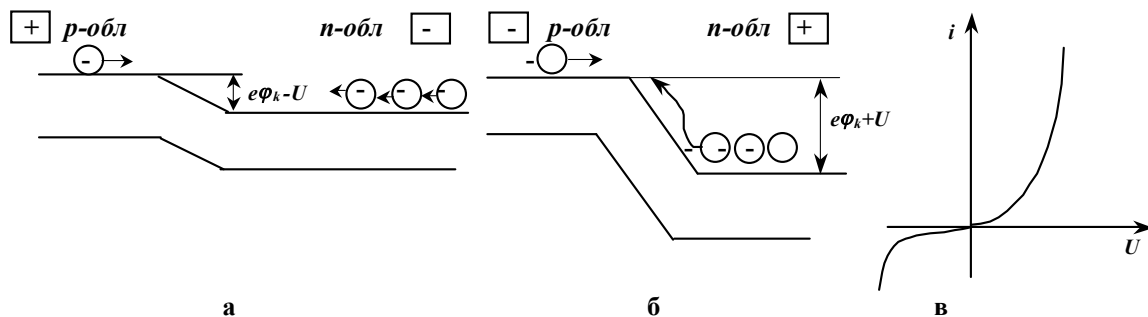


Рисунок 13.8

викривляються, рівень Фермі в р і n-області встановлюється на одному рівні.

При прикладанні до р-області \oplus , а до n-області \ominus зменшується висота потенціального бар'єра, і таким чином, збільшується кількість носіїв - електронів, що переходять з n-області в р, і дірок, що переходять з р-області в n-область (рис. 13.8, а).

При збільшенні напруги потенціальний бар'єр зменшується - струм зростає (прямий струм).

Якщо прикласти до р-області \ominus , а до n-області \oplus , то висота потенціального бар'єра зростає; кількість електронів, що можуть перейти із n-області в р-область наближається до нуля, тому струм забезпечується неосновними носіями - електронами, що переходять із р-області, і дірками, які переходять з n-області в р-область (рис. 13.8, б).

Кількість неосновних носіїв невелика, тому струм (зворотний струм), який ними зумовлений, - невеликий.

Вольт-амперна характеристика, що відповідає розглянутим процесам у р-n-переході, представлена на рис. 13.8, в.

Струм називається прямим, коли відповідає зовнішній різниці потенціалів (напрузі) U , прикладеній у прямому напрямку, а при зворотній полярності зовнішньої різниці потенціалів він називається зворотним. При прикладанні зовнішньої напруги в прямому напрямку струм зростає по експоненті, а в зворотному - він швидко насичується і на порядок менший від прямого. Так що коефіцієнт випрямлення

$$k = \frac{i_{np}}{i_{ze}} \sim 10^9.$$

Існує цілий ряд напівпровідникових приладів із р-n-переходом. Їх різновидності:

1. Напівпровідникові діоди, що служать:

а) випрямлячами;

б) нелінійними елементами для виділення певної гармоніки.

2. Фотодіоди - це фотоелементи з р-n-переходом, які служать для генерації електричного струму при їх освітленні.

Наявність р-n-переходу призводить до розділення пари електрон-дірка, які були створені під дією світла, тому і утворюється різниця потенціалів, а при замиканні кола протікає фотострум.

3. Світлодіоди - перетворювачі електричної енергії в світлову. Важливі складові оптоелектроніки.

4. Напівпровідникові лазери.

5. Стабілітрони - стабілізатори напруги.

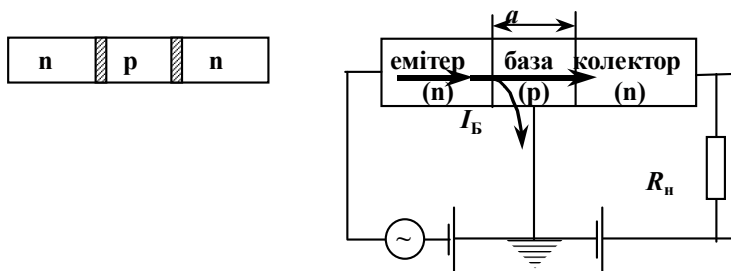


Рисунок 13.9

В транзисторі при подаванні змінного сигналу основна частина інжекттованих носіїв із емітера через базу, яка є дуже тонкою, проходить в область колектора, де втягується завдяки полю колекторного р-n-переходу в колекторне коло транзистора, що має великий внутрішній опір (рис. 13.9). Цей перехід включений у зворотному напрямку.

Товщина бази робиться настільки малою, щоб до колектора дійшли майже всі носії. Тому:

$$i_k = \alpha i_e, \alpha > 0,9, \text{ тобто } i_k \approx i_e.$$

Транзистор - це напівпровідниковий прилад, в якому є два р-n-переходи, що розділяють три області: емітер, базу, колектор. Бувають n-p-n і p-n-p транзистори.

Транзистор - це твердотільний аналог підсилювальної електронної лампи.

Перейшовши в область колектора, носії викликають відповідне перетікання електричних носіїв у зовнішньому колі й оскільки внутрішній опір колектора дуже великий, послідовно з ним можна підключати великий навантажувальний зовнішній опір R_n .

Принцип підсилення якісно можна описати формулами:

- 1) $i_e \approx i_k$
- 2) $u_e = u_{вих} = i_e \cdot R_e$
- 3) $i_k \cdot R_n = U_{R_n} = U_{вих}$
- 4) $R_k \gg R_e, R_n \gg R_e (R_{вих})$

Оскільки

- 5) $U_n \gg U_e, P_{вих} \gg P_{вх}$, то коефіцієнт підсилення $\frac{U_n}{U_{вх}} = \frac{R_n}{R_{вх}} \gg 1$.

Транзистори служать для підсилення напруги й потужності, чим і відрізняються від трансформаторів. Вибір режиму роботи дозволяє використати транзистори як електронні ключі.

Напівпровідниковий прилад з трьома р-п-переходами, що служить також ключем, називається тиристор.

Задача. Вимірюючи зміни електроопору при нагріванні напівпровідникового терморезистора, з певною точністю визначають ширину забороненої зони напівпровідника ΔE , з якого виготовлено цей терморезистор. Знайти ширину забороненої зони напівпровідника, з якого виготовлено терморезистор, що включений по схемі, зображеній на рис. 13.10, якщо спад напруги на ньому при нагріванні став меншим вдвічі при збільшенні температури від 17°C до 27°C . Спад напруги при 17°C $U_1=0,9$ В. Е.р.с джерела $\varepsilon=1$ В. Внутрішній опір джерела $r=2$ Ом. Вказаний інтервал температур відповідає області власної провідності напівпровідника.

1. Електроопір напівпровідника в області власної провідності змінюється з підвищенням температури за законом:

$$R = R_0 e^{\frac{\Delta E}{2KT}} \quad (\text{a})$$

ΔE – ширина забороненої зони напівпровідникового матеріалу; K – стала Больцмана; T – температура, К.

2. Згідно з схемою рисунка 13.10 за законом Ома

$$U_1 = \frac{\varepsilon}{R_1 + r} R_1 \quad (t_1=17^\circ\text{C}),$$

$$U_2 = \frac{\varepsilon}{R_2 + r} R_2 \quad (t_2=27^\circ\text{C}).$$

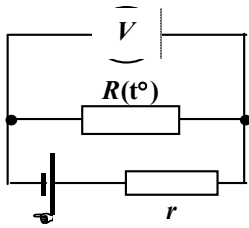


Рисунок 13.10

3. Звідси:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1(R_2 + r)}{R_2(R_1 + r)} = \alpha. \quad (\text{б})$$

4. Після перетворень отримуємо відношення:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_1}{r} (\alpha - 1) + \alpha. \quad (\text{в})$$

5. З другого боку із формули (а)

$$\frac{R_1}{R_2} = e^{\frac{\Delta E}{2K} \left[\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right]} = e^{\frac{\Delta E}{2K} \left[\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right]}. \quad (\text{г})$$

6. Отже, прирівнюючи формули (в) та (г) виразимо ширину забороненої зони через відомі параметри:

$$\frac{\Delta E}{K} \left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right) = \ln \left(\frac{R_1}{r} (\alpha - 1) + \alpha \right).$$

7. Із закону Ома можна знайти R_1 :

$$R_1 = \frac{U_1 r}{\varepsilon - U_1}.$$

8. Тому:

$$\Delta E = \frac{KT_1 T_2}{T_1 - T_2} \ln \left[\frac{U_1 (\alpha - 1)}{\varepsilon - U_1} + \alpha \right]. \quad (\text{д})$$

$\Delta E \approx 1,6$ еВ (обчислена ширина забороненої зони).

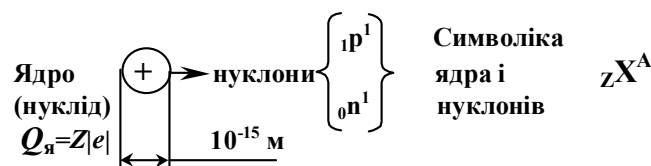
КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ «ПРОВІДНІСТЬ МЕТАЛІВ, ДІЕЛЕКТРИКІВ, НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ»

1. Поясніть утворення енергетичних зон у твердому тілі.
2. Чим відрізняються метали, діелектрики та напівпровідники з точки зору зонної теорії?
3. Що таке донори та акцептори? За рахунок яких причин вони виникають?
4. Які типи носіїв розрізняють у напівпровідниках?
5. Як залежить опір напівпровідника від температури? Поясніть причини відмінностей від металів.
6. Які особливості спостерігаються при контакті двох напівпровідників із різними типами провідності?
7. Що таке *p-n*-перехід? Поясніть механізм його утворення. Який напрямок струму називається «прямим», а який «зворотним»?
8. Поясніть принцип роботи діода з *p-n*-переходом.
9. Як працює транзистор?
10. Перерахуйте типи відомих Вам напівпровідникових приладів.

14 ФІЗИКА ЯДРА ТА ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

14.1 Будова ядра. Ізотопи

Атомні ядра всіх елементів, крім атома водню, складаються із нейтронів і протонів. Ядро атома водню складається із однієї елементарної частинки – протона. Його заряд $+e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.



X – хімічний символ елемента, Z – зарядове число (кількість протонів), A – масове число; $N = A - Z$ – кількість нейтронів.

Приклад: ${}_{92}\text{U}^{238}$.

Маємо протонів $p - 92=Z$; нейтронів $N - (238-92)=146$. Маса протона $\approx 1836m_e$. Його позначення ${}_1^1p$. Нейтрон позначається ${}_0^1n$, його заряд дорівнює нулю, $m_n \approx m_p + 2,5m_e$, ${}_0^1n$ – частинка нестабільна. Період його напіврозпаду $T_{1/2}=12$ хвилин

${}_0^1n \xrightarrow{T_{1/2}=12 \text{ хв}} {}_1^1p + {}_1^0e + \bar{\nu}$. Це схема, за якою нейтрони, що знаходяться у вільному стані, розпадаються. Період напіврозпаду – це час, протягом якого розпадається половина початкової кількості ядер або частинок.

Нейтрони поділяються на теплові, повільні й швидкі в залежності від кінетичної енергії. Вона дорівнює:

у теплових $\sim kT$ (k – стала Больцмана, T – кімнатна температура),

у повільних $\sim \text{KeV}$,

у швидких $\sim \text{MeV}$.

Ядра діляться на ізотопи, ізобари, ізотони, в залежності від значення Z , A , N .

Приклади:

1) ізотопи ${}_1^1\text{H}$, ${}_1^2\text{H}$, ${}_1^3\text{H}$ (протон, дейтрон, тритон);

2) ізобари Ca^{40} , K^{40} ;

3) ізотони ${}_6\text{C}^{13}$, ${}_7\text{N}^{14}$.

Як бачимо з прикладів, ізотопи мають однакове зарядове число, тобто число протонів, ізобари – однакове масове число, ізотони – однакову кількість нейтронів.

Розміри ядра в залежності від кількості нуклонів досить точно можна знайти із виразу: $r=1,2 \cdot 10^{-13} A^{1/3}$ см, A – масове число.

Для дослідження ядер використовують маспектральний аналіз та ядерний магнітний резонанс. Спіни нуклонів у сумі дають спін ядра.

Спін нуклона дорівнює $1/2$. Спіни ядер не перевищують кількох одиниць. Це вказує на те, що спіни більшості нуклонів компенсують один одного в ядрі, розміщуючись антипаралельно.

14.2 Енергія зв'язку атомного ядра. Дефект маси

Дефект маси – це різниця мас пов'язаних і вільних нуклонів.

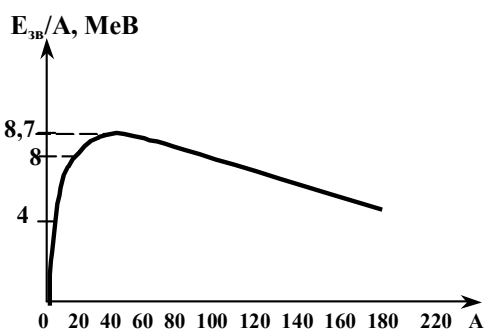


Рисунок 14.1

$$\Delta m = M_{ze} - M_e \rightarrow \Delta m = N \cdot m_n + Z \cdot m_p - m_y$$

де N – кількість нейтронів, m_n – маса нейтронів, m_p – маса протонів.

$$\Delta m = (A - Z)m_n + Z \cdot m_p - m_y$$

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

Енергія зв'язку – це енергія, яка необхідна для того, щоб розділити нуклони, що утворюють ядра, на відстань, при якій вони між собою не будуть взаємодіяти.

$$\Delta E = c^2 [(A - z)m_n + z \cdot m_p - m_y] \text{ [Дж]}$$

$$\Delta E = 931 [(A - z)m_n + z \cdot m_p - m_y] \text{ [MeV]}$$

Енергія зв'язку на один нуклон (питома енергія зв'язку), як бачимо із рис. 14.1, залежить від масового числа і досягає максимуму для ядер, що лежать в інтервалі 50-60. Енергія зв'язку для цих ядер досягає значення 8,7 МеВ/нуклон. Така залежність питомої енергії зв'язку показує, що енергетично можливими є 2 процеси: 1) поділ важких ядер на більш легкі; 2) злиття легких ядер в одне ядро (синтез). Ці процеси повинні супроводжуватися виділенням великої кількості енергії. Порівняйте: при згорянні вугілля з'єднуються два атоми кисню з одним вуглецю і виділяється енергія 5

eВ. При з'єднанні двох ядер важкого водню мало б виділитися майже в 5 мільйонів разів більше енергії.

14.3 Радіоактивність. Властивості, реєстрація випромінювання

Радіоактивність – це самовільне перетворення ядер одних елементів в інші, що супроводжується випромінюванням елементарних частинок.

- 1) ${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z-X} Y^{A-4} + {}_2 \text{He}^4$ (α -розпад);
- 2) ${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z+1} Y^A + {}_{-1} e^0 + \tilde{\nu}$ (β^- -розпад);
- 3) ${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z-1} Y^A + {}_{+1} e^0 + \nu$ (β^+ -розпад).

До радіоактивних процесів також відносяться

- 4) ${}_Z X^A + {}_{-1} e^0 \rightarrow {}_{Z-1} Y^A + \nu$ (електронне захоплення);
- 5) γ -випромінювання ядер;
- 6) спонтанний поділ важких ядер на дві приблизно рівні частини;
- 7) протонна радіоактивність (випускання протонів при ядерному перетворенні).

Процес α -розпаду пояснюється сильною взаємодією, супроводжується тунельним ефектом.

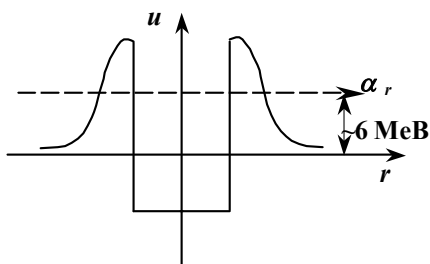


Рисунок 14.2

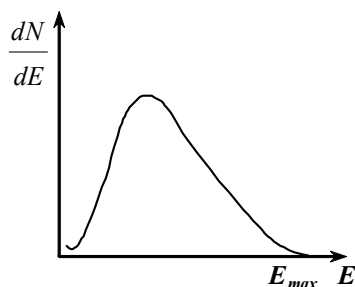


Рисунок 14.3

Коли α -частинка покидає ядро, їй необхідно подолати бар'єр, що більше повної енергії α -частинки (див. рис. 14.2). За класичними законами це неможливо. Однак, згідно з квантовою механікою існує відмінна від нуля ймовірність просочитися через бар'єр (тунелювання).

β -розпад пояснюється так званою слабкою взаємодією. Розподіл β -частинок по енергіях, вказує на те, що доля енергії відбирається при β -розпаді якоюсь частинкою, що практично не має маси спокою і заряду (рис. 14.3).

Крім того, участь в β -розпаді ще однієї частинки (нейтрино або антинейтрино) є необхідною згідно з законом збереження моменту імпульсу. Спін нейтрино дорівнює $\frac{1}{2}$.

β^+ -частинки – позитрони ${}_{+1} e^0$ – це античастинка електрона.

$\tilde{\nu}$ – це антинейтрино (відрізняється від нейтрино напрямком спіна). Як і нейтрино, $\tilde{\nu}$ має дуже високу проникність, слабо поглинається речовиною, ці частинки важко зафіксувати.

При радіоактивному перетворенні ядер окремі ядра розпадаються незалежно одне від другого. Тому для ядер кількості dN , що розпадаються за час dt , можна записати:

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

або

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

Проінтегрувавши цей вираз, отримаємо:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \text{ – закон радіоактивного розпаду,}$$

де λ - стала розпаду, N – кількість ядер, що не розпалися в момент часу t .

Кількість розпадів у радіоактивному препараті за одиницю часу називається активністю. Активність вимірюється в СІ розп/с. Допускаються несистемні одиниці Кюрі та розп/хв.

1 Ку = $3,7 \cdot 10^{10}$ розпад/с (кюрі).

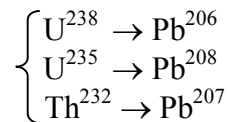
Оскільки період напіврозпаду – це час, протягом якого розпадається половина початкової кількості ядер, то можна записати

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

і

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

Розрізняють природну і штучну радіоактивності. В природі існують три ряди (сімейства) радіоактивних елементів, що характеризуються різними початковими і кінцевими ядрами розпаду. Це -



Штучних радіоактивних ядер – більше 1000.

Гама-випромінювання виникає при радіоактивному розпаді, коли ядро, що утворилося, знаходиться в збудженому стані. При поверненні збудженого ядра в нормальний стан, це ядро випромінює γ -промені, що являють собою електромагнітні хвилі довжиною від 10^{-3} до 1 \AA .

Застосування γ -променів

1. Металургія: дослідження процесів дифузії.
2. Машинобудування: визначення якості виготовлених деталей або конструкцій.
3. Біологія і медицина: дослідження міграції, популяцій різних тварин, птахів, комах, лікування онкозахворювань.

14.3.1 Методи реєстрації частинок

Елементарні частинки реєструють по слідах, що вони залишають у середовищі та ефектах, які супроводжують їх проходження при цьому.

14.3.1.1 Сцинтиляційні лічильники. Іонізаційний лічильник Гейгера-Мюллера. Напівпровідникові детектори

Сцинтиляційні лічильники виготовляють із люмінофорів, в яких заряджені частинки збуджують атоми. При переході атомів у нормальний стан виникає помітний світловий спалах, що реєструється фотопомножувачем.

У лічильнику Гейгера-Мюллера (рис. 14.4) використовується несамостійний (тихий) розряд, що виникає при попаданні елементарних частинок у лічильник.

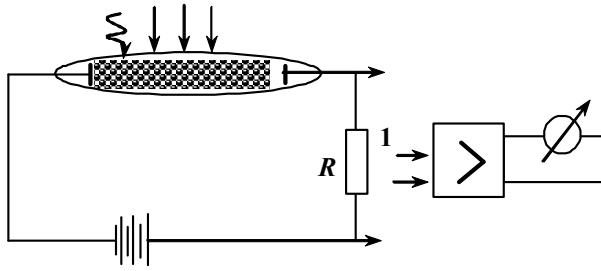


Рисунок 14.4

Сам лічильник складається з циліндричного корпусу, по осі якого закріплений на ізоляторах тонкий анод у вигляді нитки. Катодом служить корпус. Між катодом і анодом прикладена висока напруга.

Напівпровідникові детектори випромінювання за принципом роботи нагадують

лічильники Гейгера-Мюллера, іонізація відбувається при проходженні частинок в р-переході, що ввімкнений у зворотному напрямку.

14.3.1.2 Реєстрація нейтронів. Камера Вільсона

Нейтрони не залишають слідів, але можуть себе виявити в момент породження ними заряджених частинок, або іонізації, що викликана породженими зарядженими частинками.

Робота камери Вільсона заснована на іонізації пересиченої пари внаслідок дії потоку частинок і осіданні на йонах молекул конденсованої пересиченої пари. В результаті залишається видимий слід польоту частинок (трек).

Модернізацією методу була заміна пересиченої пари розтягнутою рідиною (бульбашкова камера), поміщення камери в магнітне поле. За кривизною траєкторії та її напрямком закручування можна робити висновок про знак заряду, відношення заряду до маси, енергію частинки.

14.3.1.3 Фотоемульсійні методи

Емульсійні камери вміщують пачки фотопластинок загальною товщиною кілька десятків сантиметрів.

Реєстрація траєкторії частинок за допомогою фотопластинок з фоточутливим шаром базується на тому, що заряджені частинки залишають на емульсії видимий слід (трек).

14.3.1.4 Детектори на ефекті Вавилова-Черенкова

Суть ефекту: виникнення свічення при русі зарядженої частинки в середовищі зі швидкістю, більшою від фазової швидкості світла в цьому середовищі. Світловий спалах реєструється фотопомножувачем. Лічильник дозволяє визначити швидкість і енергію частинки.

14.4 Біологічна дія радіації

Основною причиною поразки від радіації є поглинання енергії випромінювання клітинами живої тканини, біологічні процеси в яких при цьому порушуються. Найбільш важливим є параліч клітини. Це може призвести до смерті клітини, мутації генів, порушення хромосом і т.д. Чутливість тканин до радіації відрізняється. Найбільш чутливими є тканини, в яких відбуваються процеси активного кліткового поділу і

регенерації – кістковий мозок, лімфатична тканини, оболонка кишківника, статеві залози.

Відносна біологічна ефективність (в.б.е) різних видів випромінювання, оцінена за коефіцієнтом відносної біологічної активності (К.в.б.а.), така:

Тип випромінювання	Коефіцієнт в.б.е.
γ і X-промені	1,0
β -випромінювання	1,0
нейтрони теплові	5,0
α -частинки	10-20
нейтрони швидкі (до 20 МеВ)	10,0
нейтрони швидкі (більше 20 МеВ)	20,0

Поглинута доза іонізуючого випромінювання $[D]$ – 1 Грей – дорівнює такій поглинутій дозі випромінювання, при якій речовині масою 1 кг надається енергія іонізуючого випромінювання 1 Дж. 1 Грей – одиниця в СІ.

$$D = \frac{dw}{dm}$$

D – це відношення середньої енергії dw , яка передана іонізуючим випромінюванням речовині в елементарному об'ємі до маси dm речовини в цьому об'ємі.

Поглинута доза вимірюється також у радах.

$$1 \text{ рад} = \frac{100 \text{ ерг поглинутої енергії}}{1 \text{ г опроміненої речовини}}$$

Величина випромінювання, виміряна по іонізації повітря, називається дозою випромінювання. Її одиниця вимірювання – рентген. При одному рентгені (1 р) в 1 см^3 повітря утворюється $2,08 \cdot 10^9$ пар іонів.

Еквівалентна доза іонізуючого випромінювання H – це добуток поглинутої дози D на середній коефіцієнт якості K іонізуючого випромінювання в даному елементі біологічної тканини стандартного складу:

$$H = DK,$$

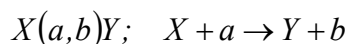
$$[H] = \text{L}^2 \text{T}^{-2}.$$

Одиниця вимірювання еквівалентної дози іонізуючого випромінювання – 1 зіверт (Sv, Зв).

|| 1 Зв дорівнює еквівалентній дозі, при якій добуток поглинутої дози в біологічній тканині стандартного складу на середній коефіцієнт якості дорівнює 1 Дж/кг.

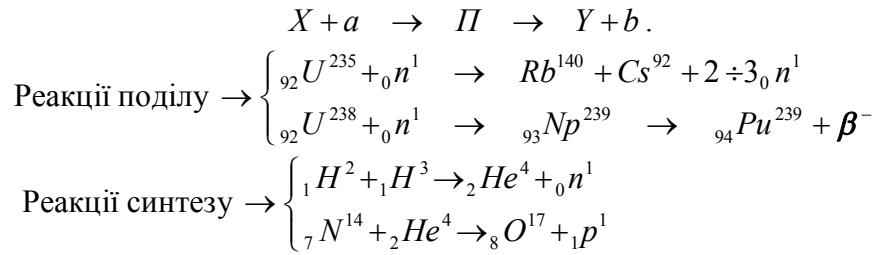
14.5 Ланцюгова ядерна реакція. Фізичні принципи отримання атомної енергії. Фізичні аспекти охорони навколишнього середовища

Ядерна реакція – це процес сильної взаємодії атомного ядра X і елементарної частинки, або ядра X з іншим ядром, у результаті чого утворюється ядро Y і нова частинка b .



- рівняння реакції для легких частинок.

Компаунд-ядро – це складне ядро Π , яке утворилося при взаємодії з ядра X і не дуже швидкої частинки a , що була захоплена ядром X . Компаунд-ядро знаходиться в збудженому стані й на другому етапі випускає частинку b



Ядерні реакції можуть викликати як поділ ядер важких елементів, так і поглинання нейтронів такими ядрами, залежно від енергії частинок. Існує певна резонансна енергія, при якій нейтрони можуть дуже активно поглинатися. В цілому ж ймовірність поглинання нейтронів ядром зменшується з ростом енергії цієї частинки. Це можна пояснити тим, що чим менша швидкість нейтрона (а, значить, його енергія), тим більше часу він проводить у сфері дії ядерних сил, пролітаючи поблизу ядра.

При резонансному поглинанні енергія, що вноситься нейтроном у компаунд-ядро, дорівнює енергії, необхідній для переходу ядра на збуджений енергетичний рівень.

Відомо, що для потоку електромагнітного випромінювання (в тому числі і γ -частинок) інтенсивність випромінювання

$$dI = -\mu I dx,$$

$$I = I_0 e^{-\mu x} \text{ - закон поглинання.}$$

Для потоку частинок N_0 , що поглинаються ядрами мішені із концентрацією n ,

$$N = N_0 e^{-\sigma n x},$$

σ - переріз захоплення ядром елементарної частинки, характеризує ймовірність взаємодії частинки і ядра

$$\sigma = \frac{1}{nx} \ln \frac{N_0}{N},$$

$[\sigma] = \text{см}^2$. Як відзначалося раніше, існує енергія, при якій нейтрони захоплюються дуже інтенсивно (резонансне захоплення), хоча, як бачимо з рис. 14.5, б, із збільшенням енергії σ , як правило, зменшується. Порядок величини $\sigma \sim 10^{-24} \text{ см}^2$.

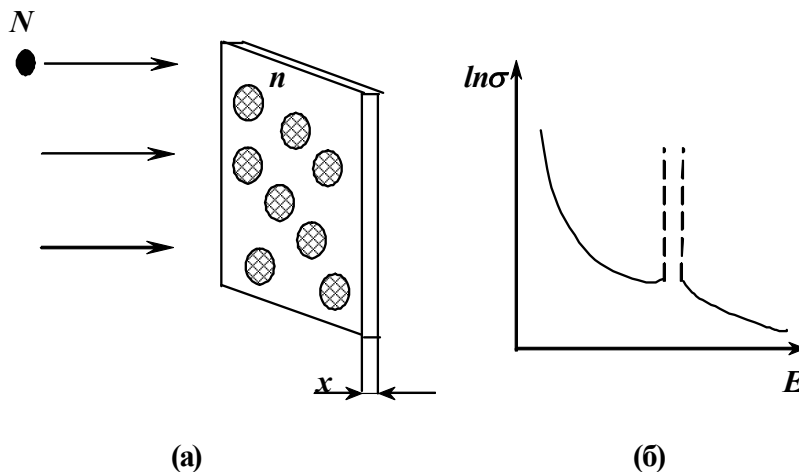


Рисунок 14.5

Реакція поділу залежить від ізотопу:
 $U \rightarrow \begin{cases} {}_{92}U^{235} \rightarrow \text{може ділитися повільними нейтронами (складає 0,72\% уранової руди)} \\ {}_{92}U^{238} \rightarrow \text{ділитися швидкими нейтронами (E>1 MeV) (складає 98\% природної уранової руди)} \end{cases}$

Щоб реакція проходила більш безпечно, треба сповільнювати нейтрони і використовувати ${}_{92}U^{235}$, тобто працювати із урановою рудою, збагаченою тим ізотопом, якого в природі мало.

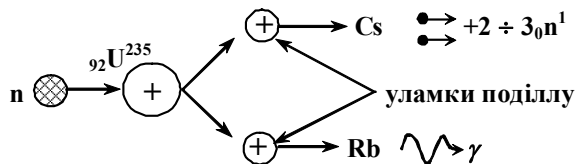


Рисунок 14.6

В якості сповільнювачів нейтронів служать: ${}_1H^2$, Be, C.

Реакція поділу носить ланцюговий характер (рис. 14.6). K – коефіцієнт розмноження, що характеризує реакцію поділу.

$$K = \frac{N_{n+1}}{N_n},$$

де N_{n+1} – кількість нейтронів в $n+1$ акті

зіткнення нейтрона з ядром атомів, N_n – кількість нейтронів у n акті.

Якщо $K < 1$ - реакція затухає.

Якщо $K > 1$ - реакція стає ланцюговою.

Якщо $K = 1$ - реакція підтримується на однаковому рівні. Щоб керувати реакцією, необхідні захоплювачі нейтронів. Захоплювачами служать такі матеріали, як Cd, B.

Якщо маса куску урану менша певної критичної, то більшість випущених

нейтронів вилітає назовні, не викликаючи поділу, і ланцюгова реакція не виникає.

На рис. 14.7 зображена спрощена схема атомної електростанції:

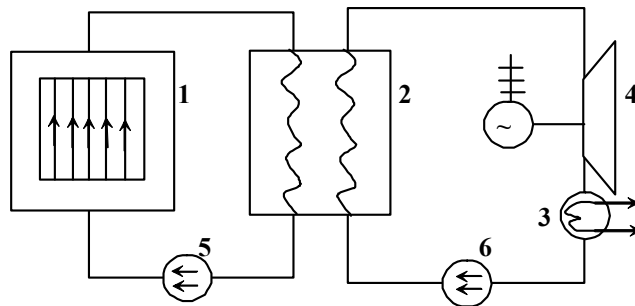


Рисунок 14.7

1. Реактор
2. Теплообмінник
3. Конденсатор
4. Турбогенератор
- 5, 6. Насоси

Основними складовими реактора (рис. 14.8) є:

1. Уранові стержні
2. Матеріал сповільнення нейтронів
3. Поглиначі нейтронів
4. Система контролю і забезпечення радіаційної безпеки

Введення уранових стержнів у реактор зменшує коефіцієнт розмноження K , а виведення – збільшує K . Автоматичний пристрій, що керує стержнями, дозволяє підтримувати потужність, яка розвивається в реакторі, на заданому рівні.

В якості теплоносія, що циркулює в теплообміннику, використовують воду і натрій ($T_{пл} = 98^\circ\text{C}$). Контроль радіаційного стану атомної станції здійснюється за допомогою датчиків і лічильників.

Прикладом термоядерної реакції може служити така реакція:

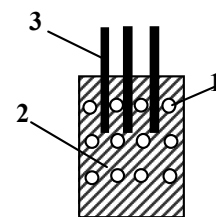
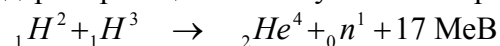


Рисунок 14.8

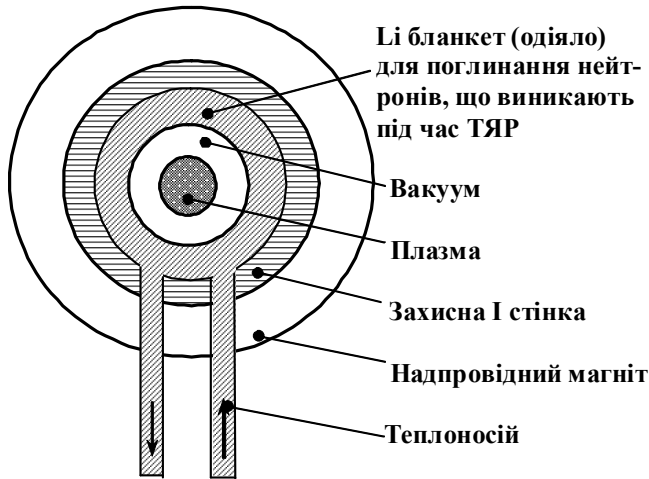


Рисунок 14.9

Енерговиділення при термоядерній реакції на одиницю маси реагуючих речовин в 10^7 разів більше, ніж у хімічних реакціях. Вступ 1 г ізотопів водню в реакцію еквівалентний згоранню 10 тон бензину.

На рис. 14.9 зображено схему поперечного перерізу термоядерного реактора.

Проблеми термоядерних реакторів на даний час можна поділити на:

- 1) фізичні;
- 2) фізико-технічні;
- 3) екологічні.

До суто фізичних проблем, що в принципі вже розв'язані, відносяться:

- 1) аналіз умов, при яких реакція синтезу може відбуватись із помітною ймовірністю, – температура плазми 80-100 млн. градусів;
- 2) оптимальне паливо – дейтерій+тритій;
- 3) термоізоляція плазми:
 - магнітне утримання плазми;
 - інерційне утримання (при імпульсному ТЯ синтезі), що має здійснюватися за допомогою потужних лазерів або потужних електронних пучків. Потужність цих джерел дозволяє нагрівати малі об'єми речовини до термоядерних температур за такий короткий час, що речовина встигає нагрітись і вступити в ТЯ реакцію раніше, ніж розлетиться внаслідок теплового руху.

До фізико-технічних проблем відноситься:

- 1) забезпечення на практиці такої тривалості процесу, щоб могла протікати реакція між ядрами легких елементів і була вироблена потужність, яка б перевищувала затрачену на запуск термоядерного реактора. Тоді можна було б забезпечити стан, при якому затрати на ініціювання термоядерної реакції перекривалися б ефективністю отриманої в результаті термоядерної реакції енергії. Для протікання такої реакції речовина повинна бути в стані плазми з температурою $\sim 5 \cdot 10^7$ К. Відношення теплової потужності, що отримується в реакторі, до потужності затрат на її виробництво, називається добротністю;
- 2) створення відповідної концентрації ядер. “Стиснення” ядер і одночасне нагрівання забезпечується магнітним полем унаслідок пропускання струму по плазмі. Час утримання енергії повинен бути обернено пропорційним до густини плазми. Для забезпечення дейтерій-тритієвої реакції при оптимальній температурі умовою отримання корисної енергії є умова: добуток густини n на час утримання енергії τ повинен дорівнювати 10^{14} см⁻³·с, тобто плазма з концентрацією 10^{14} іонів в 1 см³ повинна помітно остигати не скоріше, ніж за 1 с, або $q = n\tau$. Найкращими системами утримання плазми в магнітному полі є система типу ТОКАМАК.

До фізико-технічних і одночасно екологічних проблем відноситься створення матеріалу I-ї стінки термоядерного реактора. Хоч електростанція на термоядерних реакціях унаслідок відсутності продуктів поділу буде мати меншу радіоактивність, ніж атомні станції, але захоплення конструкційними матеріалами I-ї стінки великої кількості нейтронів, що, безумовно, виникають при протіканні реакції синтезу, може

призводити до утворення радіоактивних ізотопів. Це вимагає уважного відношення до вибору таких матеріалів і проблем їх захоронення.

Термоядерний реактор – складна споруда, яка вимагає колосальних затрат для проектування і будівництва, що не під силу окремій країні.

Екологія (за означенням) – це

1. Розділ біології, що вивчає взаємовідносини тварин, рослин, мікроорганізмів між собою та оточуючим середовищем.
2. Соціальна екологія (соціоекологія) – розділ соціології, в якому розглядаються проблеми взаємодії людини і середовища. Ця наука має свій об'єм, предмет і метод.

Соціоекологія займається кількісними оцінками взаємодії людського суспільства з природними екосистемами. В тому числі розробкою методів оцінювання ступеня забрудненості середовища, основ і методів екологічного прогнозування, граничних допустимих концентрацій для конкретних забруднювачів і т.п.

Важливим принципом даної науки є так звані енергетичний і балансовий принципи існування екосистем та їх складових.

На основі цього можна виділити фізичні аспекти проблеми охорони навколишнього середовища.

Головні з них:

- 1) дослідження термодинамічних процесів, що протікають в атмосфері та впливають на погоду, в тому числі оптичні властивості середовища;
- 2) фізико-хімічний склад атмосфери як життєво важливий для людини фактор.

Концентрація домішок 10^{-7} - 10^{-8} м⁻³ може суттєво змінити оптичні властивості атмосфери, а, значить, і погоду. Визначається це в інфрачервоній області спектра коливально-обертковими переходами молекул Н₂О, СО₂ й озону. Наявність цих домішок призводить до парникового ефекту. Якщо немає таких домішок в атмосфері, то атмосфера є прозорою в області довжин хвиль, які ефективно поглинаються та випромінюються даною домішкою.

Парниковий ефект може призвести до підвищення температури Землі, оскільки за межі атмосфери не “випускається енергія”, що генерується джерелами, і порушується тепловий баланс. У свою чергу це призводить до танення льоду, виникнення циклонів, тайфунів і т.д. Відсутність же, наприклад, озону (озонові діри) також негативно впливає на біологію Землі, внаслідок попадання інтенсивного, значить, шкідливого ультрафіолетового випромінювання.

Основні компоненти атмосфери – N, O₂ і Ar – прозорі в оптичному та інфрачервоному діапазоні спектра поглинання і випромінювання.

В якості прикладу: Оцінімо, при яких потужностях штучних джерел енергії вплив людини на клімат Землі стане суттєвим. Припустимо, що зміни температури при цьому відбуваються на 1 К. Вважаємо, що відносний вклад випаровування і конвекції в тепловий баланс буде такий, що і при реальних умовах.

Згідно з законом Стефана-Больцмана

$$\varepsilon = \sigma(T + \Delta T)^4 \approx \sigma T^4 \left(1 + 4 \frac{\Delta T}{T} \right),$$

T – початкова температура. $T_{\text{ср Землі}} \approx 288$ К.

Звідси виявляється, що при появі на Землі додаткових джерел потужністю $3,6 \cdot 10^{12}$ кВт температура підніметься на 1 К. При сучасних темпах росту енергії вказаний рівень може бути досягнутий в кінці XXI ст. або в XXII ст.

У даний час забруднення атмосфери домішками і частинками (пил, аерозоль) у результаті промислової діяльності в середньому менші, ніж природні викиди в атмосферу. Однак через нерівномірне розміщення промисловості по Землі і високу густину споживаної енергії в окремих місцях можливі локальні зміни клімату.

Наприклад, різниця між температурою у великому місті і за містом $\Delta T \sim$ до 10° . Це призводить до появи так званої теплової шапки, що обмежує обмін повітрям, утворюється застій повітря над містом, відсутня вертикальна конвекція повітря. В результаті забруднення накопичуються в атмосфері, створюючи неможливі умови для прожиття людини.

Чистота атмосфери, таким чином, визначається способом виробництва енергії і її кількістю. Звідси екологічною задачею фізики можна вважати пошуки і розробку екологічно-чистих джерел енергії.

Один із можливих шляхів цього – розвиток так званих відновлюваних джерел енергії. До них відносяться: сонячна, вітрова, океанічна, гідроенергія річок.

Задача. Визначити енергію, яка виділяється при синтезі 1 г гелію з дейтерію і тритію за реакцією ${}_1H^2 + {}_1H^3 \rightarrow 2He^4 + {}_0n^1$, якщо маси ${}_1H^2$, ${}_1H^3$, ${}_2He^4$, ${}_0n^1$ відповідно дорівнюють $m_1=2,01410$ а.о.м., $m_2=3,01605$ а.о.м., $m_3=4,00260$ а.о.м., $m_4=1,0086$ а.о.м. (атомних одиниць маси).

1. При утворенні одного ядра атома гелію виділяється енергія $\Delta E = \Delta m c^2$, Δm – різниця мас нуклонів до і після ядерної реакції. Із урахуванням того, що маса подана в атомних одиницях маси (позасистемні одиниці) $\Delta E = 931 \Delta m$ [MeV]; $\Delta E = (m_1 + m_2 - m_3 + m_4) \cdot 931$, 1 MeV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

2. В одному грамі гелію міститься N_A/μ атомів, де N_A – число Авогадро, μ – молярна маса гелію.

Тому при синтезі 1 г гелію виділиться енергія:

$$E = \frac{N_A}{\mu} (m_1 + m_2 - m_3 + m_4) \cdot 931 \text{ (MeV)},$$

або після числових підстановок і переведення в систему СІ отримуємо:

$$E \approx 4 \cdot 10^{11} \text{ Дж.}$$

14.6 Перспективи “глобальної” енергетики: аналіз із позицій фізики

1. За словами нобелівського лауреата з фізики 2000 року академіка Л.І.Алфьорова енергетика – це “фізика, хімія та чисто інженерія одночасно”. На думку цього спеціаліста світового рівня майбутнє енергетики – це тепла енергетика, що називається парогозовим циклом. Це – традиційна енергетика з багатьма внесеними фізиками технічними новинками.

2. Тривалий час буде залишатися важливою компонентою глобальної енергетики атомна енергетика, що охоплює як реактори на повільних нейтронах, так і реактори на швидких нейтронах. При цьому роль останніх буде зростати. Вважається, що ядерна енергетика при уважному дотриманні всіх умов техніки безпеки є екологічно більш чистою, ніж вугільна.

3. Можливо, до кінця ХХІ століття термоядерна енергетика стане важливим джерелом енергії. Як про реалію про це можна буде говорити в середині цього століття. За цими прогнозами бачимо, що майже на століття зсувається застосування керованого термояду людством.

4. За оцінками спеціалістів до 2030 року близько 10% електроенергії буде вироблятися на основі фотоелектричної напівпровідникової технології. К.к.д. найкращих фотоелементів нині складає 30-35%. Деяке ускладнення технології тунельно пов’язаних у наборі *p-n*-переходів (три *p-n*-перехода) буде давати к.к.д. 40-45%, що є доволі високим для будь-яких енергетичних систем.

До того ж сонячна енергетика екологічно дуже чиста.

5. Видатну роль буде відігравати енергозбереження. Помітним резервом цього може служити перехід на освітлення білими світлодіодами. Їх отримують на основі широкозонних напівпровідників. За оцінками експертів до 2030 року буде замінено близько 50% усіх джерел освітлення, на такі світлодіоди, що дозволить зекономити майже 10% електрики в цілому світі.

6. В даний час перші помітні кроки робить воднева енергетика. Важливим аргументом на користь її розвитку служить охорона оточуючого середовища: адже при згорянні водню в атмосферу викидається тільки водяна пара. Для автомобільної галузі це вигідно ще й тим, що крім відсутності забруднення атмосфери також економиться первинне паливо. Уже в світі з'явилися серійні автомобілі із водневим двигуном та заправочні станції (Ісландія).

З точки зору перспективності безпосереднього перетворення хімічної енергії в електричну великий інтерес представляють паливні елементи, в яких паливом служить водень, а окислювачем – або кисень, або повітря. В паливних елементах іонізація відбувається при помірних температурах при наявності каталізаторів із групи платинових металів. Принцип роботи таких елементів аналогічний роботі батарейки із лужним електролітом. Замість електроліта служить полімер (твердополімерний електроліт). Іони водню, що виникли на аноді, під дією різниці потенціалів між анодом і катодом дифундують через шар полімера до катода. При замиканні зовнішнього кола на катоді відбувається реакція між киснем та іоном водню, електронами, що перейшли через зовнішнє коло. Продукт реакції – вода.

К.к.д. паливних елементів – 40-70%, а максимальна е.р.с. – 1,23 В. Однак для їх широкого застосування необхідно понизити вартість елементів на порядок.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛІВ 11-14

1. Які види спектрів ви знаєте?
2. Визначити границі, в яких має лежати енергія бомбардуючих електронів, щоб при збудженні атомів водню ударами цих електронів спектр водню мав тільки одну спектральну лінію.
3. Чим відрізняється лазерне випромінювання від випромінювання звичайної лампочки?
4. Яка особливість метастабільного рівня, що відрізняє його від інших?
5. Перерахуйте можливі напрямки застосування ОКГ.
6. Яка причина утворення енергетичних зон в твердих тілах?
7. Перерахуйте види зон в твердих тілах.
8. Що називається акцептором? Донором?
9. Чим відрізняється власна провідність напівпровідника від домішкової?
10. Чому температурна залежність провідності напівпровідників в різних діапазонах температур має різний вигляд?
11. Що таке p-n-перехід? Поясніть принцип випрямлення струму.
12. Перерахуйте відомі вам різновидності напівпровідникових приладів.
13. Охарактеризуйте склад ядра.
14. Як знайти енергію зв'язку ядер?
15. Записати реакції α , β^+ , β^- розпаду.
16. Записати приклади ядерної реакції синтезу та ядерної реакції поділу.
17. Які фізичні аспекти проблем екології ви знаєте?
18. Сформулюйте перспективи розвитку енергетики.

ПРОГРАМНІ ПИТАННЯ

1. Основні фізичні величини. Фізичний зміст, одиниці вимірювання.
2. Швидкість і прискорення. Лінійна і кутова швидкості. Нормальне й тангенціальне прискорення. Кутове прискорення.
3. Закони Ньютона.
4. Сили тяжіння, тертя. Закон Гука. Пружні модулі.
5. Робота і потужність. Зв'язок роботи зі зміною кінетичної і потенціальної енергії. Задачі.
6. Кінетична енергія обертового руху твердого тіла.
7. Момент імпульсу.
8. Основне рівняння обертового руху твердого тіла. Момент сили і момент інерції.
9. Закони збереження в механіці (імпульсу, моменту імпульсу та енергії). (Приклади задач).
10. Амплітуда, фаза, період, частота гармонійних коливань. (Приклади фізичних систем).
11. Явище резонансу. Умова резонансу. Резонанс у техніці.
12. Газові закони. Ізопроееси.
13. Моль, число Авогадро.
14. Теплоємність речовини.
15. Перший закон термодинаміки.
16. Другий закон термодинаміки.
17. Теплові та холодильні машини. Тепловий насос. ККД.
18. Вічні двигуни першого та другого роду.
19. Плавлення (кристалізація), випаровування (конденсація). Кипіння. Теплота фазового переходу.
20. Закон Кулона.
21. Напруженість електричного поля. Потенціал, різниця потенціалів.
22. Електроємність. Конденсатори. Енергія зарядженого конденсатора.
23. Електричний струм. Сила струму, густина струму.
24. Закон Ома (загальна форма й часткові випадки).
25. Різниця потенціалів, ЕРС, напруга.
26. Закон Джоуля-Ленца.
27. Взаємодія струмів. Закон Ампера, сила Лоренца.
28. Явище електромагнітної індукції. ЕРС електромагнітної індукції. Правило Ленца.
29. Самоіндукція. ЕРС самоіндукції. Індуктивність.
30. Взаємоіндукція. Трансформатор.
31. Коливний контур. Формула Томсона.
32. Електромагнітні хвилі. Їх характеристики. Шкала електромагнітних хвиль.
33. Отримання змінного струму. Сила струму і напруга; миттєві, амплітудні та ефективні значення.
34. Активний та реактивний опори. Потужність у колі змінного струму.
35. Дифракція, інтерференція та поляризація. Їх застосування.
36. Закони теплового випромінювання. Пірометрія.
37. Кванти світла.
38. Фотоефект, закони та застосування.
39. Випромінювання та поглинання світла атомами. Лазери та їх застосування.
40. Хвильові властивості частинок. Електронний мікроскоп.
41. Поділ твердих тіл на діелектрики, метали та напівпровідники.
42. Провідність металів, діелектриків, напівпровідників. Надпровідність.

43. Р-п-перехід. Напівпровідникові діоди та транзистори.
44. Будова ядра. Ізотопи.
45. Енергія зв'язку атомного ядра. Дефект маси.
46. Радіоактивність. Властивості, реєстрація випромінювання.
47. Біологічна дія радіації.
48. Ланцюгова ядерна реакція.
49. Фізичні принципи отримання атомної енергії.
50. Фізичні аспекти охорони навколишнього середовища.

15 ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОПІДГОТОВКИ, САМОСТІЙНИХ ТА КОНТРОЛЬНИХ РОБІТ

15.1 Методичні вказівки до розв'язування задач

Наведені в даному та наступному 16 розділі завдання побудовані із врахуванням сучасних освітніх вимог і спрямовані на перевірку засвоєння знань і навичок з фізики не тільки як наслідку відтворення, але і застосування в змінній ситуації. Наприклад: при вирішенні конкретних задач прикладного характеру. Тому сюди включено завдання, направлені на формування вміння пояснювати фізичні явища, а також завдання обчислювального та методичного характеру, пов'язані із розумінням головних питань, що виникають при виконанні лабораторних робіт.

Аналіз задач та їх розв'язування дозволяють зрозуміти й запам'ятати основні закони, формули, поняття, необхідні для подальшого навчання і практичного використання.

В посібнику подано приклади розв'язання задач (див. п. 15.2) та задачі для самостійної роботи.

На початку даного розділу наведено набір задач, що розв'язані, але без пояснень. Це можна вважати перехідним етапом для самостійного розв'язування.

Перед розв'язуванням задач необхідно:

- 1) уважно ознайомитися з теоретичними поняттями і формулами розділу, до якого відносяться задачі і розглянути приклади, де наведено розв'язок аналогічних задач;
- 2) уважно прочитати умову задачі й записати її в скороченій формі, виразивши всі величини в системі СІ; якщо необхідно, зробити рисунок;
- 3) скласти рівняння, що пов'язують фізичні величини і характеризують явища, які розглядаються в задачі;
- 4) розв'язати рівняння відносно тієї змінної величини, яка вважається невідомою в даній задачі;
- 5) отримавши відповідь у вигляді алгебраїчного виразу або рівняння, проаналізувати його і зробити числовий розрахунок;
- 6) дати відповідь і перевірити розмірність знайденої величини, реальність отриманого результату;
- 7) при розв'язуванні давати пояснення до формул і дій, які виконуватимете.

15.2 Задачі з розв'язками

1. Теплохід вниз по річці йшов зі швидкістю 80 км/год, а вгору – зі швидкістю 76 км/год. Знайти власну швидкість теплохода і швидкість течії.

$$\begin{array}{l} \mathcal{V}_1=80 \text{ км/год} \\ \mathcal{V}_2=76 \text{ км/год} \end{array}$$

$$\mathcal{V}_{\text{ТХ}}? \mathcal{V}_{\text{Т}}?$$

$$\mathcal{V}_1 = \mathcal{V}_{\text{Т}} + \mathcal{V}_{\text{ТХ}};$$

$$\mathcal{V}_2 = \mathcal{V}_{\text{ТХ}} - \mathcal{V}_{\text{Т}};$$

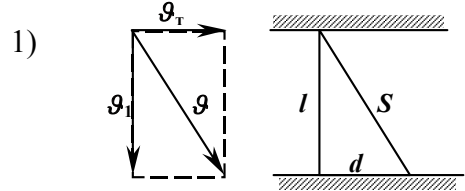
$$\mathcal{V}_{\text{ТХ}} = \frac{\mathcal{V}_1 + \mathcal{V}_2}{2}; \quad \mathcal{V}_{\text{Т}} = \frac{\mathcal{V}_1 - \mathcal{V}_2}{2}$$

$$\mathcal{V}_{\text{ТХ}}=78 \text{ км/год}; \quad \mathcal{V}_{\text{Т}}=2 \text{ км/год}$$

2. Перпендикулярно до течії річки переправляється човен. Швидкість човна $\mathcal{V}_1=1.4$ м/с, швидкість течії $\mathcal{V}_2=0.7$ м/с, ширина річки $l=308$ м. Знайти час t , за який човен пересіче річку. На скільки метрів знесе човен за течією?

$$\begin{array}{l} \mathcal{V}_1=1,4 \text{ м/с} \\ \mathcal{V}_{\text{Т}}=0,7 \text{ м/с} \\ l=308 \text{ м} \end{array}$$

$$t? d?$$



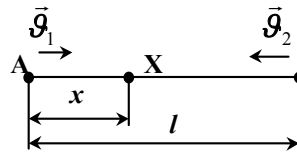
$$2) \bar{g} = \bar{g}_1 + \bar{g}_{\text{Т}}; \quad 3) t = \frac{l}{\mathcal{V}_1}; \quad 4) d = \mathcal{V}_{\text{Т}} \frac{l}{\mathcal{V}_1};$$

$$5) t = \frac{308 \text{ м}}{1,04 \text{ м/с}} = 296,15 \text{ с}; \quad 6) d = \frac{0,7 \cdot 308}{1,4} = 154 \text{ м}$$

3. З пунктів А та В, відстань між якими дорівнює l , одночасно назустріч один одному почали рухатися два тіла: перше зі швидкістю \mathcal{V}_1 , друге - \mathcal{V}_2 . Визначити, через який час вони зустрінуться, і відстань від точки А до місця їх зустрічі.

$$\begin{array}{l} l \\ \mathcal{V}_1 \\ \mathcal{V}_2 \end{array}$$

$$t? \text{ AX}?$$



$$1) l = \mathcal{V}_1 t + \mathcal{V}_2 t = t(\mathcal{V}_1 + \mathcal{V}_2);$$

$$2) t = \frac{l}{\mathcal{V}_1 + \mathcal{V}_2};$$

$$3) x = \mathcal{V}_1 t = \frac{\mathcal{V}_1}{\mathcal{V}_1 + \mathcal{V}_2} l$$

4. Автомобіль рухався зі швидкістю 54 км/год. Якою буде швидкість автомобіля через 4 с після початку гальмування, якщо при гальмуванні прискорення постійне і дорівнює за модулем 3 м/с^2 ? Який шлях пройде автомобіль за цей час?

$$\mathcal{V}_0=54 \text{ км/год}=15 \text{ м/с}$$

$$t=4 \text{ с}$$

$$a=3 \text{ м/с}^2$$

$$\mathcal{V} |_{t=4 \text{ с}}? s?$$

$$1) \mathcal{V}_t = \mathcal{V}_0 - at;$$

$$\mathcal{V}_t = 15 - 3 \cdot 4 = 3 \text{ (м/с)};$$

$$2) s = \mathcal{V}_0 t - \frac{at^2}{2};$$

$$s = 15 \cdot 4 - \frac{3 \cdot 16}{2} = 36 \text{ м}$$

5. Автомобіль пройшов шлях від пункту А до пункту В зі швидкістю $\mathcal{V}_1=40$ км/год і назад зі швидкістю $\mathcal{V}_2=30$ км/год. Яка середня швидкість \mathcal{V}_{cp} автомобіля?

$$\mathcal{V}_1=40 \text{ км/год}$$

$$\mathcal{V}_2=30 \text{ км/год}$$

$$s_1=s_2=s/2$$

$$\mathcal{V}_{cp}?$$

$$1) \mathcal{V}_{cp} = \frac{s}{t};$$

$$2) \mathcal{V}_{cp} = \frac{s}{\frac{s}{2\mathcal{V}_1} + \frac{s}{2\mathcal{V}_2}} = \frac{2\mathcal{V}_1 \cdot \mathcal{V}_2}{\mathcal{V}_1 + \mathcal{V}_2};$$

$$3) \mathcal{V}_{cp} = \frac{2 \cdot 40 \cdot 30}{70} \approx 34 \text{ км/год}$$

6. Стрілу випустили з лука вертикально вгору зі швидкістю 30 м/с. На яку висоту вона підніметься?

$g_0=30 \text{ м/с}$		1) $h = \frac{gt^2}{2}$; 2) $h = \frac{g_0^2}{2g}$;
$h=?$		3) $h \approx \frac{900 \text{ м}^2/\text{с}^2}{2 \cdot 10 \text{ м/с}^2} = 45 \text{ м}$

7. Два тіла кинуті вертикально вгору з різними початковими швидкостями. Одне з них досягло вчетверо більшої висоти, ніж інше. У скільки разів його початкова швидкість більша від початкової швидкості другого тіла?

$h_1=4h_2$		1) $h_1 = \frac{g_{01}^2}{2g}$; 2) $h_2 = \frac{g_{02}^2}{2g}$
$g_{01}/g_{02}=?$		3) $\frac{g_{01}}{g_{02}} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{1/2}$; 4) $\frac{g_{01}}{g_{02}} = 2$

8. Хвилинна стрілка годинника в 3 рази довша за секундну. Яке співвідношення між лінійними швидкостями кінців цих стрілок?

$l_{x6}=3l_{200}$		1) $g_{x6} = \omega_{x6} l_{x6}$;
$g_{x6}/g_{200}=?$		2) $g_{200} = \omega_{200} l_{200}$;
		3) $\frac{g_{x6}}{g_{200}} = \frac{\omega_{x6}}{\omega_{200}} \cdot \frac{l_{x6}}{l_{200}}$;
		4) $\frac{g_{x6}}{g_{200}} = \frac{2\pi}{1 \text{ хв}} \cdot \frac{1 \text{ год}}{2\pi} \cdot \frac{l_{x6}}{l_{200}} = 60 \cdot 3 = 180$

9. Автомобіль шириною $l=2.6$ м, який рухався зі швидкістю $g_1=25$ м/с, пробито кулею, що летіла перпендикулярно до руху автомобіля. Зміщення отворів s у стінках автомобіля відносно один одного дорівнює 0,09 м. Яка швидкість g_2 руху кулі?

$l=2.6 \text{ м}$		1) $\frac{s}{g_1} = \frac{l}{g_2}$;	
$g_1=25 \text{ м/с}$		2) $g_2 = \frac{l \cdot g_1}{s}$;	
$s=0,09 \text{ м}$		3) $g_2 = \frac{2,6 \cdot 25}{0,09} = 722 \text{ м/с}$.	
$g_2=?$			

10. Автомобіль рухається зі швидкістю $g=60$ км/год. Скільки обертів за секунду роблять його колеса, якщо вони котяться по шосе без ковзання, а зовнішній діаметр покришок колес дорівнює $d=60$ см? Знайти доцентрове прискорення зовнішнього шару на покришках його коліс.

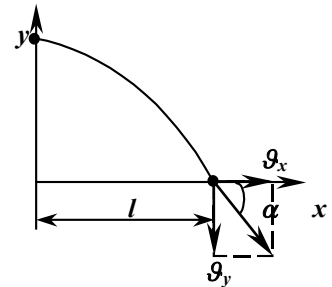
$g=60 \text{ км/год}$		1) $g = \omega R = \omega \frac{d}{2}$;
$d=60 \text{ см}=0,6 \text{ м}$		2) $v = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{2g}{d \cdot 2\pi} = \frac{g}{d\pi}$;
$v=? a=?$		3) $v = \frac{60 \cdot 10^3}{3,6 \cdot 3,14 \cdot 0,6 \cdot 10^3} \approx 9 \text{ об/с}$;
		4) $a = \frac{g^2}{R} = \frac{2g^2}{d}$;
		5) $a = \frac{2 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{3,6 \cdot 3,6 \cdot 10^6 \cdot 0,6} \approx 926 \text{ м/с}^2$.

11. На верстаті свердлиться отвір діаметром $D=15 \cdot 10^{-3}$ м зі швидкістю $\mathcal{G}=0.628$ м/с і подачею $h=0.3 \cdot 10^{-3}$ м за один оберт. Яка глибина отвору H , якщо його свердлили протягом $t=60$ с?

$D=15 \cdot 10^{-3}$ м	1) $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi R}{\mathcal{G}} = \frac{\pi D}{\mathcal{G}};$
$\mathcal{G}=0.628$ м/с	2) $\mathcal{G}_n = \frac{h}{T} = \frac{h \cdot \mathcal{G}}{\pi D};$
$h=0.3 \cdot 10^{-3}$ м	3) $H = \mathcal{G}_n \cdot t = \frac{h \mathcal{G}}{\pi D} t;$
$t=60$ с	
$H=?$	4) $H = \frac{0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,628}{3,14 \cdot 15 \cdot 10^{-3}} 60 = 0,24$ м

12. Кинутий горизонтально камінь упав на землю через $t=0.5$ с на відстані $l=5$ м по горизонталі від місця кидання. Знайти кут між вектором швидкості й горизонтом у момент падіння.

$t=0.5$ с	1) $\mathcal{G}_x = const;$
$l=5$ м	2) $\mathcal{G}_x = \frac{l}{t};$
$\alpha=?$	3) $\mathcal{G}_y = gt;$
	4) $tg\alpha = \frac{\mathcal{G}_y}{\mathcal{G}_x} = \frac{gt \cdot t}{l} = \frac{gt^2}{l};$
	5) $tg\alpha \approx \frac{10 \cdot 0,25}{5} \approx 0,5,$
	$\alpha \approx 26,5^\circ.$



13. Ліфт масою $M=3 \cdot 10^3$ кг піднімається з прискоренням $a=0.49$ м/с². 1. Визначити натяг каната, при допомозі якого піднімається ліфт. 2. Яким буде натяг каната в початковий момент спуску ліфта з тим же прискоренням і при його русі з постійною швидкістю вгору і вниз?

$M=3 \cdot 10^3$ кг	I.
$a_0=a_n=0.49$ м/с ²	
$T=? T_0=? T_c=?$	

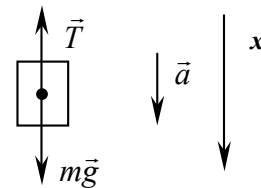
1) $m\vec{a} = \vec{T} + m\vec{g};$
 2) $ma = T - mg;$ 3) $T = ma + mg = m(a + g)$
 4) $T = 3 \cdot 10^3 (0,49 + 9,8) \approx 3,15 \cdot 10^4$ Н.

II. 1) $m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{T}_0;$

2) $ma = mg - T_0;$

3) $T_0 = m(g - a)$

4) $T = 3 \cdot 10^3 (9,8 - 0,49) \approx 2,79 \cdot 10^3$ Н.



III.

1) $m\vec{a} = \vec{T} + m\vec{g} = 0;$

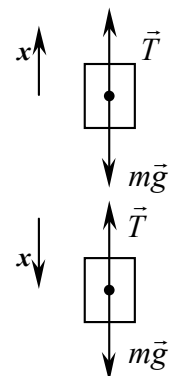
2) $T = -mg;$

3) $T \approx -3 \cdot 10^4$ Н.

1) $\vec{T} + m\vec{g} = 0;$

2) $T = -mg;$

3) $T \approx -3 \cdot 10^4$ Н



14. З гори починають ковзати санки з прискоренням 0.5 м/с^2 . Який шлях пройдуть санки, якщо швидкість їх біля підніжжя гори 36 км/год ?

$$a=0,5 \text{ м/с}^2$$

$$v=36 \text{ км/год}$$

$$s=?$$

$$1) s = \frac{at^2}{2} \quad (v_0=0); \quad 2) v_t = at;$$

$$3) s = \frac{a \cdot v^2}{a^2 \cdot 2} = \frac{v^2}{2a};$$

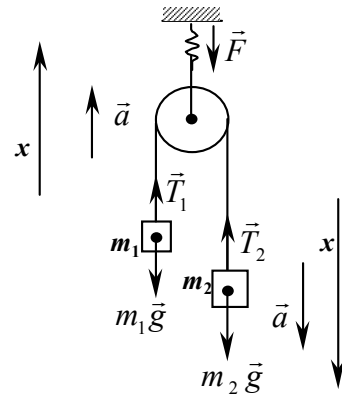
$$4) s = \frac{100}{2 \cdot 0,5} = 100 \text{ м.}$$

15. До кінців шнура, перекинутого через блок, підвішені вантажі $m_1=50 \text{ г}$ і $m_2=75 \text{ г}$. Нехтуючи тертям і вважаючи блок і шнур невагомими, а шнур нерозтяжним, визначити прискорення, з яким будуть рухатися вантажі, натяг шнура і показ динамометра, на якому висить блок.

$$m_1=50 \text{ г}$$

$$m_2=75 \text{ г}$$

$$a=? \quad T=? \quad F=?$$



- 1) блок і шнур – невагомі, тому $T_1 = T_2 = T$, а прискорення

$$a_1 = a_2 = a;$$

$$2) -m_1g + T = m_1a;$$

$$3) m_2g - T = m_2a; \quad 4) a = \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1} \cdot g = \frac{1}{5}g;$$

$$4) T = m_2g - m_2a = m_2g \left(1 - \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1} \right) = \frac{2m_1m_2}{m_2 + m_1}g;$$

$$5) F = 2T = \frac{4m_1m_2}{m_2 + m_1}g; \quad 6) F = 1,2 \text{ Н.}$$

16. При якій тривалості доби на Землі вага тіла на екваторі дорівнювала б нулю? Радіус Землі $6.4 \cdot 10^6 \text{ м}$.

$$R=6.4 \cdot 10^6 \text{ м}$$

$$P=0$$

$$T=?$$

$$1) \frac{m g^2}{R} = mg; \quad 2) \frac{g^2}{R} = \omega^2 R = g;$$

$$3) \omega = \frac{2\pi}{T}; \quad 4) T = 2\pi \left(\frac{R}{g} \right)^{1/2};$$

$$5) T = 6,28 \left(\frac{6,4 \cdot 10^6}{10} \right)^{1/2} \approx 5 \cdot 10^3 \text{ с.}$$

17. Яку силу F треба прикласти до сталю стержня перерізом $S=1 \text{ см}^2$, щоб розтягнути його на стільки, на скільки він видовжується при нагріванні на $\Delta t=1^\circ\text{C}$? Коефіцієнт лінійного розширення $\alpha=12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/град}$. Модуль Юнга $E=2.1 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$.

$$S=1 \text{ см}^2$$

$$\Delta t=1^\circ\text{C}$$

$$\alpha=12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/град}$$

$$E=2.1 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$$

$$F=?$$

$$1) \Delta l = \alpha l_0 \Delta t^\circ; \quad 2) F = \sigma \cdot S;$$

$$3) \frac{\Delta l}{l_0} = \varepsilon = \frac{\sigma}{E}; \quad 4) \alpha \Delta t^\circ = \frac{\sigma}{E};$$

$$5) F = \alpha \Delta t^\circ \cdot E \cdot S;$$

$$6) F = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 10^{-4} = 252 \text{ Н.}$$

18. Тіло кинуте вертикально догори зі швидкістю $\mathcal{G}_0=16$ м/с. На якій висоті h кінетична енергія тіла дорівнюватиме його потенційній енергії?

$$\mathcal{G}_0=16 \text{ м/с}$$

$$E_{\text{к}}=E_{\text{п}}$$

$$h=?$$

$$1) E_{\text{п max}} = E_{\text{к max}} = \frac{m\mathcal{G}_0^2}{2} = E;$$

$$2) E_{\text{к}}=E_{\text{п}} \text{ (за умовою), } E=E_{\text{п}}+E_{\text{к}}=2E_{\text{п}};$$

$$3) \frac{m\mathcal{G}_0^2}{2} = 2E_{\text{п}} = 2mgh;$$

$$4) h = \frac{\mathcal{G}_0^2}{4}; 5) h=64 \text{ м.}$$

19. Тіло масою 1 кг рухається по столу, маючи в початковій точці швидкість $\mathcal{G}_0=2$ м/с. Досягнувши краю стола, висота якого $h=1$ м, тіло падає. Коефіцієнт тертя тіла об стіл $k=0.1$. Визначити кількість теплоти, що виділилася при ударі об землю. Шлях, який пройшло тіло по столу, $s=2$ м.

$$m=1 \text{ кг}$$

$$\mathcal{G}_0=2 \text{ м/с}$$

$$h=1 \text{ м}$$

$$k=0.1$$

$$s=2 \text{ м}$$

$$Q=?$$

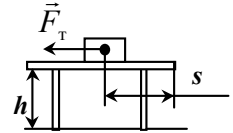
$$1) Q = E_{\text{к1}} + E_{\text{к2}};$$

$$2) E_{\text{к1}} = \frac{m\mathcal{G}_1^2}{2} = \frac{m\mathcal{G}_0^2}{2} - F_{\text{т}}s;$$

$$3) E_{\text{к2}} = E_{\text{п}} = mgh;$$

$$4) Q = \frac{m\mathcal{G}_0^2}{2} - kmgs + mgh;$$

$$5) Q = 1 \cdot \left(\frac{4}{2} - 0,1 \cdot 0,1 \cdot 2 + 10 \right) = 10 \text{ Дж.}$$



20. З гармати в горизонтальному напрямі стріляють снарядом масою $m=3$ кг. Визначити, яка середня сила діє на снаряд під час пострілу, якщо довжина ствола $l=2$ м, а час пострілу $t=5 \cdot 10^{-3}$ с.

$$m=3 \text{ кг}$$

$$l=2 \text{ м}$$

$$t=5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$$

$$F_c=?$$

$$1) F_c \Delta t = \Delta(m\mathcal{G}); 2) F_c = \frac{m\Delta\mathcal{G}}{\Delta t} = ma;$$

$$3) s = \frac{at^2}{2}; 4) a = \frac{2s}{t^2}; 5) F_c = \frac{2ms}{t^2};$$

$$6) F_c = \frac{6 \cdot 2}{25 \cdot 10^{-6}} = 0,48 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

21. Мисливець, який перебуває у нерухомому човні, стріляє під кутом 30° до горизонту. На скільки зміститься човен, якщо маса мисливця з човном 80 кг, маса дробу 40 г, швидкість дробу 400 м/с, середня сила опору води 4 Н?

$$m_1=80 \text{ кг}$$

$$m_2=40 \text{ г}$$

$$\mathcal{G}=400 \text{ м/с}$$

$$F_c=4 \text{ Н}$$

$$\alpha=30^\circ$$

$$l=?$$

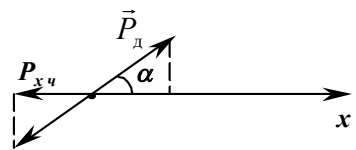
$$1) \vec{P} = \text{const}; 2) P_{x_у} = P_{x_д};$$

$$3) P_{x_у} = m_2\mathcal{G}_2 \cos \alpha; 4) \frac{m_1\mathcal{G}_у^2}{2} = F_c l;$$

$$5) m_1\mathcal{G}_у = m_2\mathcal{G}_2 \cos \alpha;$$

$$6) \mathcal{G}_2 = \frac{m_2}{m_1} \mathcal{G}_2 \cos \alpha; 7) l = \frac{m_1\mathcal{G}_у^2}{2F_c} = \frac{m_1 m_2}{m_1^2} \cdot \frac{\mathcal{G}_2^2 \cos^2 \alpha}{2F_c};$$

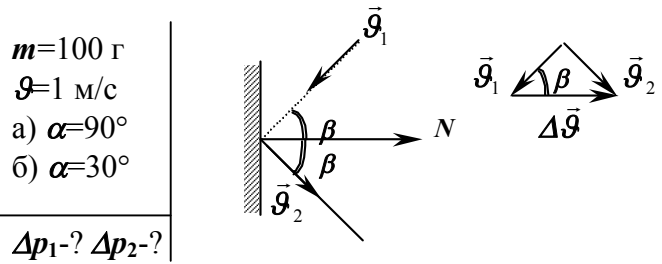
$$8) l = \frac{(4 \cdot 10^{-2})^2}{80} \cdot \frac{(400)^2 \cdot 3}{2 \cdot 4 \cdot 4} = 0,3 \text{ м.}$$



22. Хокейна шайба, маючи початкову швидкість $\vartheta_0=5$ м/с, ковзає до удару об борт площадки $s=10$ м. Удар вважати абсолютно пружним, коефіцієнт тертя шайби об лід $k=0.1$, опором повітря знехтувати. Визначити, який шлях пройде шайба після удару.

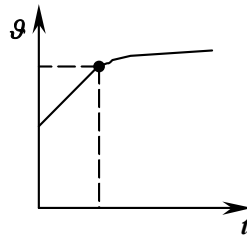
$\vartheta_0=5$ м/с	1) $E_{k1} = \frac{m\vartheta_1^2}{2} = \frac{m\vartheta_0^2}{2} - F_{\tau} \cdot s = F_{\tau} \cdot s_1;$
$s=10$ м	2) $s_1 = \frac{\frac{m\vartheta_0^2}{2} - F_{\tau} \cdot s}{F_{\tau}} = \frac{m\vartheta_0^2}{2kmg} - s;$
$k=0.1$	
$s_1=?$	3) $s_1 = \frac{25}{2} - 10 = 2,5$ м.

23. Кулька масою $m=100$ г, що рухається зі швидкістю $\vartheta=1$ м/с, пружно вдаряється у площину. Визначити зміну імпульсу кульки, якщо напрямок швидкості складає з площиною кут α , рівний: а) 90° ; б) 30° .



- $\Delta \vartheta = \vartheta_2 \cos \beta - (-\vartheta_1 \cos \beta) = \vartheta_2 \cos \beta + \vartheta_1 \cos \beta;$
- $\vartheta_1 = \vartheta_2 = \vartheta;$ 3) $\Delta \vartheta = 2\vartheta \cos \beta;$ 4) $\beta = 90^\circ - \alpha;$
- $\Delta \vartheta = 2\vartheta$ ($\alpha = 90^\circ$);
- $\Delta p_1 = 2(\Delta m \vartheta) = 2m\Delta \vartheta = 0,2$ кг·м/с;
- $\Delta p_2 = 2\Delta p_1 \cos 60^\circ = 0,1$ кг·м/с

24. Тіло рухається по прямій рівноприскоренно під дією постійної сили F . Як зміниться графік швидкості цього руху, якщо сила F почне зменшуватися?



- $F_p = ma;$
- $a = \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \vartheta}{\Delta t};$
- при $\Delta t = const$ $\Delta \vartheta = a \Delta t;$
- $\Delta \vartheta = \frac{F}{m} \Delta t = kF.$

25. Граната, що летіла зі швидкістю 10 м/с, розірвалася на два уламки. Більший уламок, маса якого складала 60% маси всієї гранати, продовжував рухатися в тому ж напрямку, але з більшою швидкістю, рівною 25 м/с. Знайти швидкість меншого уламка.

- $M\vec{\vartheta} = const$ або $m_1\vec{\vartheta}_1 + m_2\vec{\vartheta}_2 = const$ (закон збереження імпульсу);
- $M\vartheta = 0,6M\vartheta_1 - 0,4M\vartheta_2$ (враховано напрямки імпульсів та маси уламків);
- $\vartheta = 0,6\vartheta_1 - 0,4\vartheta_2;$
- $\vartheta_2 = \frac{10 - 25 \cdot 0,6}{-0,4} = 12,5$ м/с.

26. Локомотив на горизонтальному шляху розвиває постійну силу тяги в 147 кН. На ділянці шляху довжиною 600 м швидкість поїзда збільшилась з 9 м/с до 15 м/с. Знайти силу опору руху F_T , якщо маса поїзда дорівнює 10^6 кг.

$F_L=147$ кН | **I варіант:** зміна кінетичної енергії
 $S=600$ м | за рахунок роботи результуючої сили
 $g_1=9$ м/с
 $g_2=15$ м/с

$$m=10^6 \text{ кг} \quad 1) \frac{m g_2^2 - m g_1^2}{2} = A_p = F_p S;$$

$$F_T - ? \quad 2) F_p = F_L - F_T;$$

$$3) F_T = F_L - F_p = F_L - \frac{A_p}{S},$$

$$F_T = F_L - \frac{m g_2^2 - m g_1^2}{2S} = F_L - \frac{m(g_2^2 - g_1^2)}{2S}.$$

II варіант: знайти модуль результуючої сили (сила тяги локомотива мінус сила тертя) і використати 3-н Ньютон та співвідношення кінематики

$$1) F_p = ma \text{ (2-й закон Ньютон)}; \quad 2) a = \frac{g_2 - g_1}{t}$$

(за означенням для рівноприскореного руху);

$$3) S = g_1 t + \frac{at^2}{2} \text{ (для рівноприскореного руху)};$$

$$4) g_2 - g_1 = at \text{ (з формули 2)};$$

$$5) S = g_1 t + \frac{at^2}{2} = g_1 t + \frac{(g_2 - g_1)t}{2} = \frac{g_1 + g_2}{2} t;$$

$$6) t = \frac{2S}{g_1 + g_2}; \quad 7) a = \frac{g_2 - g_1}{2S} (g_1 + g_2) = \frac{g_2^2 - g_1^2}{2S};$$

$$8) F_p = m \frac{g_2^2 - g_1^2}{2S};$$

$$9) F_T = F_p - F_L = F_L - \frac{m(g_2^2 - g_1^2)}{2S}.$$

27. Сталева кулька масою $m=3$ г вільно падає з висоти $h_1=1.5$ м на горизонтальну кам'яну плиту і підстрибує після удару на висоту $h_2=1$ м. Визначити зміну імпульсу кульки при ударі.

$$m=3 \text{ г} \quad 1) mgh_1 = \frac{m g_1^2}{2}; \quad 2) mgh_2 = \frac{m g_2^2}{2};$$

$$h_1=1.5 \text{ м} \quad 3) g_1 = \sqrt{2gh_1}; \quad 4) g_2 = \sqrt{2gh_2};$$

$$h_2=1 \text{ м} \quad 5) \Delta p = m g_1 - (-m g_2) = m(g_1 + g_2);$$

$$6) \Delta p = m\sqrt{2g}(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2});$$

$$\Delta p - ? \quad 7) \Delta p = 3,4 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$$

28. Гімнаст обертається на перекладині. В скільки разів його вага при проходженні нижнього вертикального положення більша за вагу в стані спокою? Швидкість руху гімнаста у верхньому вертикальному положенні вважати рівною нулю.

$$=mg$$

$$1) N - mg = ma;$$

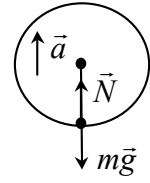
$$2) N = |G|;$$

$$G/p-?$$

$$3) N = m(a + g) = m\left(\frac{g^2}{R} + g\right);$$

$$4) \frac{mg^2}{2} = mg \cdot 2R; 5) \frac{g^2}{R} = 4g;$$

$$6) \frac{G}{p} = \frac{m \cdot 5g}{mg} = 5.$$



29. Паровий молот масою 10 т вільно падає з висоти 2.5 м на залізну болванку масою 200 кг. На нагрівання болванки йде 30% кількості теплоти, що виділяється при ударі. Скільки разів падав молот, якщо температура болванки піднялася на 20°C? Питома теплоємність заліза 460 Дж/(кг·К), прискорення вільного падіння 9.8 м/с².

$$m_1=10 \text{ т}$$

$$h=2.5 \text{ м}$$

$$m_2=200 \text{ кг}$$

$$Q/E=0.3$$

$$\Delta t^\circ=20^\circ\text{C}$$

$$c=460 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$$

$$g=9.8 \text{ м}/\text{с}^2$$

$$n-?$$

$$1) E = m_1gh \cdot n;$$

$$2) Q = cm_2\Delta t^\circ;$$

$$3) m_1gh \cdot n = \frac{Q}{0.3} = \frac{cm_2\Delta t^\circ}{0.3};$$

$$4) n = \frac{cm_2\Delta t^\circ}{0.3 \cdot m_1gh};$$

$$5) n = \frac{460 \cdot 200 \cdot 20}{0.3 \cdot 10^4 \cdot 1 \cdot 2.5 \cdot 9.8} \approx 25$$

30. До гумового шнура завдовжки $l=10$ см прикріплено камінь масою $m=10$ г. Коли шнур почали обертати зі швидкістю 60 об/хв, він видовжився на $\Delta l=2$ см. Знайти жорсткість шнура.

$$l=10 \text{ см}$$

$$m=10 \text{ г}$$

$$g=60 \text{ об}/\text{хв}$$

$$\Delta l=2 \text{ см}$$

$$k-?$$

$$1) \frac{mg^2}{R} = ma = k\Delta x;$$

$$2) \Delta x = \Delta l; 3) g = \omega l' = 2\pi\nu l';$$

$$4) \frac{m4\pi^2\nu^2 l'^2}{l'^2} = k\Delta l;$$

$$5) k = \frac{m4\pi^2\nu^2}{\Delta l} l' = \frac{4\pi^2\nu^2 m(l + \Delta l)}{\Delta l};$$

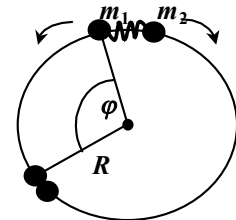
$$6) k = \frac{4 \cdot 12,56 \cdot 1 \cdot 12 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-2}} \approx 3 \text{ Н}/\text{м}$$

31. Вантажом, масою $M=5 \cdot 10^2$ кг, що падає з висоти $h=1.2$ м, забивають сваю, яка від удара входить в землю на глибину 2.5 м. Визначити середню силу удару і його тривалість, якщо маса сваї багато менша за масу вантажу.

$$\begin{array}{l}
 M=5 \cdot 10^2 \text{ кг} \quad 1) Mgh = F_c s; \quad 2) F_c = \frac{Mgh}{s}; \\
 M \gg m \quad 3) M\vartheta - (-M\vartheta) = 2M\vartheta = F_c \Delta t; \\
 h=1.2 \text{ м} \quad 4) F_c = \frac{5 \cdot 10^2 \cdot 10 \cdot 1.2}{2.5} \approx 2.4 \cdot 10^3 \text{ Н}; \\
 s=2.5 \text{ м} \quad 5) \Delta t = \frac{2M\vartheta}{F_c}; \quad 6) \vartheta = \sqrt{2gh}; \\
 F_c - ? \quad \Delta t - ? \quad 7) \Delta t = \frac{2M\sqrt{2gh} \cdot s}{Mgh} = \frac{2\sqrt{2} \cdot s}{\sqrt{gh}}; \\
 8) \Delta t = \frac{2\sqrt{2} \cdot 2.5}{\sqrt{12}} \approx 2 \text{ с}; \quad 9) [\Delta t] = \frac{M}{\sqrt{\frac{M}{c^2} \cdot M}} = c
 \end{array}$$

32. У гладкому горизонтальному жолобі, що має форму кола радіусом R , знаходяться дві маленькі кульки масами m_1 і m_2 . Між кульками вставлена пружина, стиснута ниткою. В деякий момент нитку перепалюють і кульки починають рухатися по жолобу. Знайти: а) в якому місці відбудеться зіткнення кульок. Масою і розмірами пружини знехтувати; б) через який час після перепалювання нитки кульки зіткнуться 2-й (n -й) раз, якщо потенціальна енергія стиснутої пружини була рівна W_p .

m_1, m_2 – маса кульок
 R – радіус кола
 W_p – енергія пружини
 x -? t_1 -? t_n -?



(Вигляд зверху)

$$\begin{array}{l}
 1) \frac{J_1 \omega_1^2}{2} + \frac{J_2 \omega_2^2}{2} = W_p; \quad 2) J_1 \omega_1 = J_2 \omega_2 \quad (3\text{-н збереження імпульсу}); \\
 3) \omega_2 = \frac{J_1 \omega_1}{J_2} = \frac{m_1 R^2}{m_2 R^2} \omega_1; \quad 4) \omega_1 = \frac{J_2}{J_1} \omega_2; \\
 5) \frac{J_1 J_2^2}{J_1^2} \omega_2^2 + J_2 \omega_2^2 = 2W_p; \quad 6) \omega_2^2 \left(\frac{J_2^2}{J_1} + J_2 \right) = 2W_p; \\
 7) \omega_1 = \frac{J_2}{J_1} \sqrt{\frac{2W_p}{\frac{J_2^2}{J_1} + J_2}} = \frac{m_2 R^2}{m_1 R^2} \sqrt{\frac{2W_p}{\frac{m_2^2 R^4}{m_1 R^2} + m_2 R^2}}; \\
 8) \omega_1 = \frac{m_2}{m_1} \sqrt{\frac{2W_p m_1}{m_2^2 + m_1 m_2}} \cdot \frac{1}{R}; \quad 9) \omega_2 = \frac{\omega_1}{R} \sqrt{\frac{2W_p m_1}{m_2^2 + m_1 m_2}} \\
 10) [\omega_1] = \frac{\text{кг}}{\text{кг}} \cdot \sqrt{\frac{\text{Дж} \cdot \text{кг}}{\text{кг}^2} \cdot \frac{1}{\text{м}^2}} = \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{кг}} \cdot \frac{1}{\text{м}^2}} = \frac{1}{\text{с}}; \\
 11) (\omega_1 + \omega_2) t_1 = 2\pi; \quad 12) t_1 = \frac{2\pi}{\omega_1 + \omega_2}; \\
 13) \varphi = \frac{2\pi \omega_1}{\omega_1 + \omega_2}; \quad 14) t_n = \frac{2\pi n}{\omega_1 + \omega_2}
 \end{array}$$

33. Скільки молекул міститься в 1 см³ води? Яка маса молекул води? Який приблизно розмір молекули води?

$$\begin{array}{l} \rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1 \text{ г/см}^3 \\ V = 1 \text{ см}^3 \\ \mu_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \text{ г/моль} \\ n - ? \quad m_{\text{H}_2\text{O}} - ? \quad d_{\text{H}_2\text{O}} - ? \end{array} \left| \begin{array}{l} 1) m = \rho V; 2) \mu = m_{\text{H}_2\text{O}} N_A; 2a) v = \frac{m}{\mu} \\ 3) m = m_{\text{H}_2\text{O}} N_A v = m_{\text{H}_2\text{O}} n V; 4) \rho = \frac{m}{V}; \\ 5) \rho = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}} n V}{V} = \frac{\mu n}{N_A}; 6) n = \frac{\rho}{\mu} N_A; \\ 7) m_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\mu}{N_A}; 8) V = d_{\text{H}_2\text{O}}^3 N; \\ 9) d_{\text{H}_2\text{O}}^3 = \frac{V}{N} = n^{-1}; 10) d_{\text{H}_2\text{O}} = n^{-3} = \left(\frac{\rho}{\mu} N_A \right)^{-3}; \\ 11) n \approx \frac{1}{18} \cdot 6 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}; 12) m_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{18}{6 \cdot 10^{23}} \approx 3 \cdot 10^{-23} \text{ г}; \\ 13) d_{\text{H}_2\text{O}} \approx 1 \cdot 10^{-8} \text{ см} = 1 \text{ \AA} \end{array} \right.$$

34. Обчислити кінетичну енергію теплового руху всіх молекул повітря в кімнаті ($t = 0^\circ\text{C}$). Об'єм кімнати – 140 м³, тиск повітря – 10⁵ Па. Скільки води можна було б нагріти від 0° до 50°С при повному використанні цієї енергії?

$$\begin{array}{l} c = 4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К} \\ i = 6 \\ V = 140 \text{ м}^3 \\ p = 10^5 \text{ Па} \\ t_1 = 0^\circ\text{C} \\ t_2 = 50^\circ\text{C} \\ m - ? \end{array} \left| \begin{array}{l} 1) pV = \frac{m}{\mu} RT; \\ 2) u = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} RT = pV \frac{i}{2} RT; \\ 3) u = \Delta Q = pV \frac{i}{2} RT; \\ 4) u = \Delta Q = cm\Delta T; \\ 5) \Delta t = \Delta T; 6) m = \frac{u}{c\Delta T}; 7) m = \frac{pViRT}{2c\Delta T}; \\ 8) m = \frac{10^5 \cdot 140 \cdot 6 \cdot 8,3 \cdot 10^3 \cdot 273}{4,19 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 50} \approx 8 \cdot 10^7 \text{ кг}. \end{array} \right.$$

35. При якому мінімальному значенні швидкості свинцева куля при ударі об стінку може нагрітися до температури плавлення? Початкова температура кулі 27°С.

$$\begin{array}{l} \mu_{\text{Pb}} = 206 \text{ кг/кмоль} \\ t_{\text{пл}} = 327^\circ\text{C} \\ t_0 = 27^\circ\text{C} \\ \mathcal{G}_{\text{min}} - ? \end{array} \left| \begin{array}{l} 1) \frac{m \mathcal{G}_{\text{min}}^2}{2} = Q = cm\Delta t = c(t_{\text{пл}} - t_0); \\ 2) \mathcal{G}_{\text{min}} = \sqrt{2c\Delta t^\circ}; 3) c = \frac{3R}{\mu}; \\ 4) \mathcal{G}_{\text{min}} = \sqrt{2 \frac{3R}{\mu} \Delta t^\circ}, \end{array} \right.$$

$$\mathcal{G}_{\text{min}} = \sqrt{6 \cdot \frac{8,3 \cdot 10^3}{206} \cdot 300} \approx 260 \text{ м/с}.$$

36. У закритій посудині об'ємом $V=10^{-3} \text{ м}^3$ міститься кисень під тиском $p=10^5 \text{ Н/м}^2$ при $T_1=323 \text{ К}$. Посудину з киснем охолодили до $T_2=223 \text{ К}$, внаслідок чого тиск у посудині знизився. Яку масу кисню при температурі T_2 треба додати в посудину, щоб тиск дорівнював початковому?

$$\begin{array}{l|l} V=10^{-3} \text{ м}^3 & 1) p_1 V = \frac{m}{\mu} RT_1; 2) p_2 V = \frac{m}{\mu} RT_2; \\ p_1=10^5 \text{ Н/м}^2 & 3) p_1 V = \frac{m + \Delta m}{\mu} RT_2; \\ T_1=323 \text{ К} & 4) \Delta m = \frac{p_1 V \mu}{RT_2} - m; 5) m = \frac{p_1 V \mu}{RT_1}; \\ T_2=223 \text{ К} & 6) \Delta m = \frac{p_1 V \mu}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right), \\ p_2=p_1 & \end{array}$$

$\Delta m - ?$

$$\Delta m = \frac{10^5 \cdot 10^{-3} \cdot 32}{8.31 \cdot 10^3} \left(\frac{1}{223} - \frac{1}{323} \right) \approx 5.42 \cdot 10^{-4} \text{ кг}$$

37. У котлі парової машини температура $t_1=150^\circ\text{С}$. Температура холодильника $t_2=10^\circ\text{С}$. Яку теоретично максимальну роботу може виконати машина, якщо в топці, коефіцієнт корисної дії якої 80%, спалено 200 кг вугілля з теплотворною здатністю $3.1 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$?

$$\begin{array}{l|l} \lambda=3.1 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг} & 1) \eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}; 2) \eta = \frac{A}{Q_1}; \\ m=200 \text{ кг} & 3) Q_1 = \eta_r m \lambda; \\ t_1=150^\circ\text{С} & 4) A = \eta Q_1 = \eta_r \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1} \right) m \lambda; \\ t_2=10^\circ\text{С} & 5) A = 0.8 \cdot \frac{140}{423} \cdot 200 \cdot 3.1 \cdot 10^7, \\ \eta_r=80\% & A \approx 1.6 \cdot 10^{19} \text{ Дж} \\ A - ? & \end{array}$$

38. Машина, яка працює за циклом Карно, одержала певну кількість теплоти від нагрівника при 200°С . Холодильник має температуру 100°С . За певний час машина одержала від нагрівника 10^4 Дж енергії. Визначити виконану роботу, передану холодильнику, кількість теплоти і коефіцієнт корисної дії.

$$\begin{array}{l|l} t_n=t_1=200^\circ\text{С} & 1) Q_n=Q_x+A; \\ t_x=t_2=100^\circ\text{С} & 2) \eta = \frac{Q_n - Q_x}{Q_n} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{A}{Q_n}; \\ Q_n=10^4 \text{ Дж} & 3) \frac{Q_x}{Q_n} = \frac{T_2}{T_1}; \\ A - ? \quad Q_x - ? & \end{array}$$

$$4) Q_x = \frac{T_2}{T_1} Q_n = \frac{373}{473} \cdot 10^4 \approx 8 \cdot 10^3 \text{ Дж};$$

$$5) A = Q_n - Q_x = Q_n \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) = \frac{100}{473} \cdot 10^4 \approx 2 \cdot 10^3 \text{ Дж}$$

$$\text{або } 6) A = \frac{T_1 - T_2}{T_1} Q_n \text{ (з формули 2);}$$

$$7) \eta = \frac{2 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^4} = 0.2 = 20\% .$$

39. Годинник, маятник якого складається з вантажу малих розмірів і легкої латунної нитки, йде правильно при 0°C . Знайти коефіцієнт лінійного розширення латуні, якщо при підвищенні температури до $t=+20^\circ\text{C}$ годинник за добу відстане на 16 с.

$$\begin{array}{l|l}
 t=24 \text{ год} & 1) l_t=l_0(1+\alpha\Delta t^\circ), \alpha=\frac{l_t-l_0}{l_0\Delta t^\circ}=\frac{\Delta l}{l_0\Delta t^\circ}; \\
 \Delta t=16 \text{ с} & 2) T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}; 3) \Delta t=T_2-T_1; \\
 \Delta t^\circ=+20^\circ\text{C} & 4) T_1=2\pi\sqrt{\frac{l_1}{g}}, T_1^2=4\pi^2\frac{l_1}{g}; \\
 \alpha-? & 5) T_2=2\pi\sqrt{\frac{l_2}{g}}, T_2^2=4\pi^2\frac{l_2}{g};
 \end{array}$$

$$6) \Delta l=l_2-l_1=\frac{g}{4\pi^2}(T_2^2-T_1^2);$$

$$7) \frac{\Delta l}{l_0}=\frac{g}{4\pi^2}\cdot\frac{T_2^2-T_1^2}{gT_1^2}\cdot 4\pi^2=\frac{T_2^2-T_1^2}{T_1^2}; 8) t=T_1N_1;$$

$$9) t-\Delta t=T_2N_1; 10) \frac{T_1}{T_2}=\frac{t}{t-\Delta t}; 11) T_2=\left(1-\frac{\Delta t}{t}\right)T_1;$$

$$12) \frac{\Delta l}{l_0}=\frac{(T_2+T_1)(T_2-T_1)}{T_1^2}; 13) \frac{\Delta l}{l_0}=\frac{T_1\left(2-\frac{\Delta t}{t}\right)T_1\frac{\Delta t}{t}}{T_1^2};$$

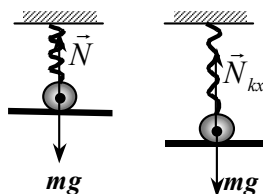
$$14) \alpha=\frac{\left(2-\frac{\Delta t}{t}\right)\cdot\Delta t}{\Delta t_0\cdot t},$$

$$\alpha=\frac{\left(2-\frac{16}{24\cdot 3.6\cdot 10^3}\right)}{20}\cdot\frac{16}{24\cdot 3.6\cdot 10^3}\approx 10^{-5} \text{ 1/град.}$$

40. Хвиля, що утворюється катером, який пройшов від берега на віддалі 200 м, докотилася до берега через 90 с. Яка довжина хвилі λ , що поширюється від катера, якщо частота ударів хвилі об берег дорівнює 0.5 Гц?

$$\begin{array}{l|l}
 v=0,5 \text{ Гц} & 1) \vartheta=\frac{x}{t}; 2) \lambda=9v=\frac{x}{t}v; \\
 x=200 \text{ м} & 3) \lambda=\frac{200}{90}\cdot 0.5=\frac{10}{9} \text{ м} \\
 t=90 \text{ с} & \\
 \lambda-? &
 \end{array}$$

41. На підставці лежить тіло, підвішене до стелі за допомогою пружини. В початковий момент пружина не розтягнута. Підставку починають опускати вниз із прискоренням a . Через який час тіло відірветься від підставки? Жорсткість пружини k , маса тіла m .



$$\begin{array}{l}
 1) ma=mg-N-kx; \\
 2) N=0 \text{ (в момент від-} \\
 \text{риву)}; \\
 3) ma=mg-kx \Rightarrow
 \end{array}$$

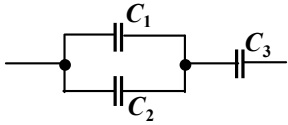
$$x=\frac{m}{k}(g-a);$$

$$4) x=\frac{a\Delta t^2}{2}; 5) \Delta t=\sqrt{\frac{2x}{a}}=\sqrt{\frac{2\frac{m}{k}(g-a)}{a}}.$$

42. Хвиля поширюється від джерела коливань уздовж натягнутого шнура зі швидкістю $\vartheta=3$ м/с. Визначити різницю фаз коливань двох точок, які містяться від джерела на відстані $l_1=4$ м і $l_2=4.3$ м, якщо період коливань $T=0.25$ с.

$\vartheta=3$ м/с	1) $\lambda=9T$; 2) $\Delta l=l_2-l_1$;
$l_1=4$ м	3) $\begin{cases} 2\pi - \lambda \\ \Delta\varphi - \Delta l \end{cases}$ (пропорція);
$l_2=4.3$ м	4) $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l = \frac{2\pi \Delta l}{9T}$;
$T=0.25$ с	5) $\Delta\varphi = \frac{2\pi \cdot 0.3}{3 \cdot 0.25} = 0.8\pi$
$\Delta\varphi - ?$	

43. Знайти ємність системи конденсаторів. Ємність кожного



конденсатора дорівнює 0.5 мкФ.

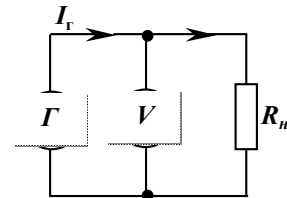
$C_1=C_2=C_3=0.5$ мкФ	1) $C_{ }=C_1+C_2$
$C - ?$	
	2) $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_{ }} = \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_1+C_2}$;
	3) $\frac{1}{C} = \frac{1}{0.5} + \frac{1}{0.5+0.5} = 3$; 4) $C = \frac{1}{3}$ мкФ.

44. На фотографії, зробленій у камері Вільсона, розміщеній в однорідному магнітному полі, траєкторія електрона являє собою дугу кола радіусом 10 см. Індукція магнітного поля 10^{-2} Тл. Знайти енергію електрона в електронвольтах.

$R=10$ см=0,1 м	1) $\frac{m\vartheta^2}{r} = q\vartheta B$; 2) $\vartheta = \frac{qBr}{m}$;
$B=10^{-2}$ Тл	3) $\frac{m\vartheta^2}{2} = \frac{q^2 B^2 r^2}{2m^2} m$;
$E_c - ?$	
	4) $E_c = \frac{(1.6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 10^{-4} \cdot 0.1^2}{2 \cdot 9.1 \cdot 10^{-31}} \approx 1.3 \cdot 10^{-14}$ Дж.

45. До генератора постійного струму з напругою на затискачах 127 В під'єднано навантаження, по якому тече струм 40 А. До затискачів генератора підключено вольтметр опором 12000 Ом. Знайти повну потужність, що віддає генератор у мережу, і потужність, що споживає вольтметр.

$U_r=127$ В	
$I_n=40$ А	
$R_V=12000$ Ом	
$P_r - ?$ $P_V - ?$	



- 1) Схема вмикання вольтметра зображена на рисунку.
 2) $P_r = U_r I_r = U_r \left(I_n + \frac{U_r}{R_V} \right)$; 3) $I_n \gg \frac{U_r}{R_V}$, тому
 4) $P_r \approx U_r \cdot I_r = 127 \cdot 40 = 5080$ Вт; 5) $U_V = U_r$;
 6) $P_V = \frac{U_V^2}{R_V} = \frac{127^2}{12000} \approx 1.3$ Вт

46. Для іонізації нейтральної молекули повітря електрон повинен мати енергію $2.4 \cdot 10^{-18}$ Дж. Знайти, при якій напруженості електричного поля електрон отримає таку енергію. Довжину вільного пробігу електрона прийняти рівною 0.0005 см.

$$\begin{array}{l|l} E_i = 2.4 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} & 1) \frac{m \vartheta^2}{2} = W_e = e \varphi; \\ \lambda = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м} & 2) E = \frac{\varphi_i}{\lambda}; 3) E = \frac{W_e}{e \cdot \lambda}; \\ E - ? & E = \frac{2.4 \cdot 10^{-18}}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{-6}} \approx 3 \cdot 10^7 \text{ В/м} \end{array}$$

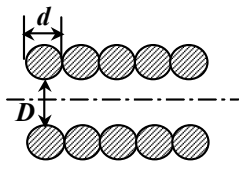
47. Максимальний заряд на обкладках конденсатора коливального контуру 10^{-5} Кл. Амплітудне значення сили струму в контурі 0.01 А. Визначити період коливань. Втрати на нагрівання не враховувати.

$$\begin{array}{l|l} q_m = 10^{-5} \text{ Кл} & 1) T = \frac{2\pi}{\omega}; 2) q = q_m \cos(\omega t + \varphi_0) \\ i_m = 0.01 \text{ А} & \text{(для LC контуру);} \\ T - ? & 3) i = \frac{dq}{dt} = -\omega q_m \sin \omega t; 4) i_m = \omega q_m; \\ & 5) i_m = \frac{2\pi}{T} q_m; \\ & 6) T = 2\pi \frac{q_m}{i_m} = 2\pi \frac{10^{-5}}{10^{-2}} \approx 6,28 \cdot 10^{-3} \text{ с.} \end{array}$$

48. Коливний контур складається з повітряного конденсатора з двома пластинами площею 10^{-2} м² і відстанню між ними 3 мм та котушки індуктивністю $1.1 \cdot 10^{-8}$ Генрі. Знайдіть, на яку довжину хвилі резонує контур? Електрична стала $8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль $3 \cdot 10^8$ м/с.

$$\begin{array}{l|l} \vartheta_{xc} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} & 1) \lambda = \frac{2\pi c}{\omega} = \vartheta_{xc} T; \\ S = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 & 2) T = 2\pi \sqrt{LC}; \\ d = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м} & 3) \lambda = 2\pi \vartheta_{xc} \sqrt{LC}; 4) C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}; \\ L = 1.1 \cdot 10^{-8} \text{ Гн} & 5) \lambda = 2\pi \vartheta_{xc} \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} L}, \\ \varepsilon = 1 & \\ \varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} & \\ \lambda - ? & \lambda = 2\pi \cdot 3 \cdot 10^8 \sqrt{\frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-2} \cdot 1.1 \cdot 10^{-8}}{3 \cdot 10^{-3}}} \approx 1 \text{ м} \end{array}$$

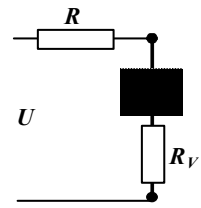
49. Скільки витків ніхромового дроту діаметром 1 мм необхідно намотати на фарфоровий циліндр радіусом 2.5 см, щоб отримати під опором 40 Ом? Питомий опір ніхрому $1 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

$$\begin{array}{l|l} d = 1 \text{ мм} & \\ D = 2 \cdot 2.5 \text{ см} = 5 \text{ см} & \\ R = 40 \text{ Ом} & \\ \rho = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м} & \\ N - ? & \end{array}$$


$$\begin{array}{l} 1) R = \rho \frac{l}{S}; 2) l = \pi D N; 3) S = \frac{\pi}{4} d^2; \\ 4) R = \rho \frac{\pi D N}{\frac{\pi d^2}{4}} = 4\rho \frac{DN}{d^2}; 5) N = \frac{R d^2}{4\rho D}, \\ N = \frac{40 \cdot 1 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-2}} = 200 \end{array}$$

50. Вольтметр, підключений послідовно з опором $R=700$ Ом, показує $U_1=50$ В при напрузі в колі $U=120$ В. Які покази дасть при цій же напрузі в колі вольтметр, якщо ввімкнути його послідовно з опором 35000 Ом?

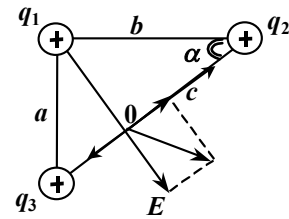
$$\begin{array}{l} R=700 \text{ Ом} \\ U_1=50 \text{ В} \\ U=120 \text{ В} \\ R_V=35000 \text{ Ом} \\ \hline U_{V2}-? \end{array}$$



- 1) $U_V = I_V R_V$; 2) $I_V = I_R$; 3) $U_{V1} = I_{V1} R_V$;
- 4) $I_1 = \frac{U_{R1}}{R_1}$; 5) $U_{R1} = U - U_{V1}$; 6) $I_1 = \frac{U - U_{V1}}{R_1}$;
- 7) $R_V = \frac{U_{V1}}{U_{R1}} R_1 = \frac{U_{V1}}{U - U_{V1}} R_1$; 8) $R_1 + R_2 = \frac{U}{I_{V2}}$;
- 9) $I_{V2} = \frac{U}{R_V + R_2}$; 10) $U_{V2} = \frac{U R_V}{R_V + R_2}$;
- 11) $R_V = \frac{50 \cdot 700}{70} = 500 \text{ Ом}$;
- 12) $U_{V2} = \frac{12 \cdot 500}{35500} \approx 1.8 \text{ В}$

51. Три однакових заряди $q=10^{-9}$ Кл кожний розміщені у вершинах прямокутного трикутника з катетами $a=30$ і $b=40$ см. Знайти напруженість електричного поля, створеного всіма зарядами в точці перетину гіпотенузи з перпендикуляром, опущеним на неї з вершини прямого кута.

$$\begin{array}{l} q_1=q_2=q_3=10^{-9} \text{ Кл} \\ a=30 \text{ см} \\ b=40 \text{ см} \\ \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \\ \hline E-? \end{array}$$



- 1) $\vec{E}_0 = \vec{E}_{q1} + \vec{E}_{q2} + \vec{E}_{q3}$; 2) $\vec{E}_{q2} + \vec{E}_{q3} = \vec{E}'$;
- 3) $\vec{E}_0 = \vec{E}' + \vec{E}_{q1}$; 4) $E' = E_{q3} - E_{q2}$;
- 5) $E_0 = \sqrt{(E')^2 + E_{q1}^2} = \sqrt{(E_{q3} - E_{q2})^2 + E_{q1}^2}$;
- 6) $E_{q1} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r_1^2}$; 7) $E_{q2} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r_2^2}$;
- 8) $E_{q3} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r_3^2}$; 9) $r_1 = b \sin \alpha$, $r_2 = b \cos \alpha$;
- 10) $\frac{r_1}{b} = \frac{a}{c}$; 11) $c = \sqrt{a^2 + b^2}$; 12) $r_1 = \frac{ab}{\sqrt{a^2 + b^2}}$,
- $r_1 \approx 0.24 \text{ м}$; 13) $\sin \alpha = \frac{r_1}{b} = 0.6$, $\cos \alpha = 0.8$;
- 14) $r_2 = 0.8b = 0.32 \text{ м}$; 15) $r_3 = c - r_2 = 0.18 \text{ м}$;
- 16) $E_0 = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0} \sqrt{\left(\frac{1}{0.18^2} - \frac{1}{0.32^2}\right)^2 + \left(\frac{1}{0.24^2}\right)^2} \approx$
 $\approx 193,4 \text{ В/м}$

52. Електродвигун, опір обмотки якого $R=2$ Ом, приводиться в рух від кола з напругою $U=110$ В. Через електродвигун під час його роботи проходить струм $I=10$ А. Яку потужність споживає цей двигун? Яка частина цієї потужності перетворюється в механічну?

$$\begin{array}{l|l}
 U=110 \text{ В} & 1) P_{\text{спож}} = IU_c; 2) P_{\text{тепл}} = I^2 R; \\
 I=10 \text{ А} & 3) P_{\text{мех}} = P_{\text{спож}} - P_{\text{тепл}}, \\
 R=2 \text{ Ом} & P_{\text{мех}} = 1100 - 200 = 900 \text{ Вт}; \\
 \hline
 P_{\text{мех}}=? & 4) \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{спож}}} = \frac{900}{1100} \approx 0.82
 \end{array}$$

53. Заряджена до потенціалу $\varphi_1=1000$ В куля радіусом $R_1=20$ см з'єднана з незарядженою кулею довгим провідником. Після цього з'єднання потенціал куль виявився $\varphi_2=300$ В. Який радіус другої кулі?

$$\begin{array}{l|l}
 \varphi_1=1000 \text{ В} & 1) q=\text{const}; \\
 R_1=0.2 \text{ м} & 2) q = C_1 \varphi_1 = 4\pi\epsilon_0 R_1 \varphi_1 = q'_1 + q'_2; \\
 \varphi_2=300 \text{ В} & 3) q'_1 = C_1 \varphi_2, q'_2 = C_2 \varphi_2; \\
 \hline
 R_2=? & 4) C_1 \varphi_1 = C_1 \varphi_2 + C_2 \varphi_2 = (C_1 + C_2) \varphi_2; \\
 & 5) 4\pi\epsilon_0 R_1 \varphi_1 = 4\pi\epsilon_0 (R_1 + R_2) \varphi_2; \\
 & 6) R_2 \varphi_2 = R_1 (\varphi_1 - \varphi_2); \\
 & 7) R_2 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_2} R_1; \\
 & R_2 = \frac{700}{300} \cdot 0.2 \approx 0.47 \text{ м}.
 \end{array}$$

54. Абсолютний показник заломлення діаманта і скла відповідно дорівнюють 2.4 і 1.5. Яким повинно бути відношення товщин цих речовин, щоб час поширення світла в них був однаковим?

$$\begin{array}{l|l}
 n_d=2.4 & 1) t = \frac{x}{g}; 2) n = \frac{c}{g}; 3) g = \frac{c}{n}; \\
 n_c=1.5 & 4) t = \frac{x}{c/n}; 5) \frac{x_d}{c/n_d} = \frac{x_c}{c/n_c}; \\
 t_1=t_2 & 6) \frac{x_d}{x_c} = \frac{n_c}{n_d}; \\
 \hline
 x_d/x_c=? & \frac{x_d}{x_c} = 0,625.
 \end{array}$$

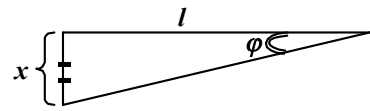
55. Знайдіть роботу виходу електрона з поверхні фотокатода і червону межу фотоефекту, якщо при опроміненні фотоелемента світлом з частотою $1.6 \cdot 10^{15}$ Гц фотострум зникає при затримуючій напрузі 4.1 В.

$$\begin{array}{l|l}
 \nu=1.6 \cdot 10^{15} \text{ Гц} & 1) h\nu = A + \frac{m g_{\text{max}}^2}{2}; \\
 U_3=4.1 \text{ В} & 2) \frac{m g_{\text{max}}^2}{2} = eU_3; \\
 A=? & 3) A = h\nu - eU_3;
 \end{array}$$

$$\begin{aligned}
 A &= 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 1,6 \cdot 10^{15} - 4,1 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = \\
 &= 6,63 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} - 4,1 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = \\
 &= 2,53 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 2,53 \text{ eВ}
 \end{aligned}$$

56. Визначити сталу дифракційної ґратки, якщо третє дифракційне зображення щілини при освітленні ґратки світлом натрієвого полум'я виявилось розміщеним від центрального зображення на відстані 16.5 см, від ґратки воно було на відстані 1.5 м. Довжина хвилі жовтого світла дорівнює 0.589 мкм.

$$\begin{aligned} n &= 3 \\ \lambda &= 0.589 \text{ мкм} \\ x &= 16.5 \text{ см} \\ l &= 1.5 \text{ м} \end{aligned}$$


 $d = ?$

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi \approx \varphi$$

$$1) d \sin \varphi = n \lambda;$$

$$2) d = \frac{n \lambda}{\varphi} = \frac{n \lambda l}{x} = \frac{3 \cdot 0.589 \cdot 10^{-6} \cdot 1.5}{0.165} \approx 17 \text{ мкм}$$

57. Початкова маса радіоактивного кобальту 4 г. Скільки грамів кобальту розпадеться за 216 діб, якщо його період піврозпаду 72 доби?

$m_0 = 4 \text{ г}$

$T_{1/2} = 72 \text{ доби}$

$t = 216 \text{ діб}$

$m_{\text{розп}} = ?$

$$1) N_0 = \frac{m_0}{\mu}; \quad 2) N = N_0 e^{-\lambda t};$$

$$3) \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}; \quad 4) m = \mu N;$$

$$5) m = m_0 e^{-\lambda t};$$

$$6) m = 4 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{72} \cdot 216} = 4 \cdot 10^{-3} \cdot 2^{-3} = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$7) m_{\text{розп}} = 4 \cdot 10^{-3} - 0.5 \cdot 10^{-3} = 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

58. Коли в стінку лічильника Гейгера-Мюллера потрапляє гамма-квант, то він спричиняє електричний розряд у лічильнику. За один розряд через лічильник проходить $5 \cdot 10^8$ електронів. Визначити середню силу струму, що проходить через лічильник, якщо за 5 хв він зафіксував 1500 гамма-квантів.

$n = 1500 \text{ } \gamma\text{-кв}$

$N = 5 \cdot 10^8 \text{ електронів}$

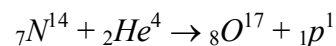
$T = 5 \text{ хв} = 300 \text{ с}$

$I_c = ?$

$$1) I_c = \frac{q}{t} = \frac{N \cdot ne}{t};$$

$$I_c = \frac{1500 \cdot 5 \cdot 10^8 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}}{300} = 4 \cdot 10^{-10} \text{ А}$$

59. В ядро азоту ударяє α -частинка і залишається в ньому, вибиваючи з ядра протон. Записати ядерну реакцію.



60. Скільки фотонів за секунду випромінює нитка електричної лампи з корисною потужністю $P=1$ Вт, якщо середня довжина хвилі випромінювання $\lambda=1$ мкм?
- | | |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\lambda=1$ мкм | 1) $P = nE$; 2) $E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$; |
| $P=1$ Вт | 3) $n = \frac{P}{E} = \frac{P\lambda}{hc}$, |
| n - ? | $n = \frac{1 \cdot 1 \cdot 10^{-6}}{6.6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} \approx 5 \cdot 10^{18}$ |
- фотонів/сек

61. Якій зміні маси Δm відповідає енергія, що виробляється за одну годину електростанцією потужністю $2.5 \cdot 10^3$ МВт?
- | | |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| $t = 1$ год. = 3600 с | 1) $\Delta E = \Delta mc^2$; 2) $\Delta E = Pt$; |
| $P = 2.5 \cdot 10^3$ МВт | 3) $\Delta m = \frac{Pt}{c^2}$, |
| Δm - ? | $\Delta m = \frac{2.5 \cdot 10^9 \cdot 3600}{9 \cdot 10^{16}} = 1 \cdot 10^{-4}$ кг = 0.1 г |

62. Визначити енергію, яка виділяється в результаті реакції ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He}$ при утворенні $m=0.25$ г гелію. Маси спокою ядра гелію $m_1=4.00387$ а.о.м., ядра літію $m_2=7.01824$ а.о.м., протона $m_3=1.00759$ а.о.м.
- $$\Delta M = \sum M_I - \sum M_{II};$$
- $$\Delta M = 7.01824 + 1.00759 - 2 \cdot 4.00387 = 8.02583 - 8.00774 = 0.01809 \text{ а.о.м.};$$
- $$\Delta E = 931 \Delta M = 16.76 \text{ MeV}$$

15.3 Задачі для самостійного розв'язання

Механіка поступального та обертового руху

- Човен рухається рівномірно поперек течії річки; її швидкість відносно берега 2 м/с, швидкість течії річки 3 м/с. З якою швидкістю рухається човен відносно води?
- Куля, що летить зі швидкістю 600 м/с, пробиває дошку товщиною 0,1 м і вилітає з неї зі швидкістю 400 м/с. Чому дорівнює модуль прискорення кулі в дошці?
- За п'яту секунду рівносповільненого руху точка проходить 5 см і зупиняється. Який шлях проходить точка за третю секунду свого руху?
- З пружинного пістолета, що міститься на висоті 2 м над землею, вилітає вертикально вгору кулька зі швидкістю 5 м/с. Визначити, на яку максимальну висоту над землею вона підніметься і яку швидкість матиме в момент удару об землю. Який час кулька перебуватиме в польоті і яке її переміщення за перші 0.2 с польоту?
- Людина перепливає річку шириною 100 м по прямій, перпендикулярно до її берегів. Швидкість плавця відносно берега 0.3 м/с, швидкість течії 0.4 м/с. Яку віддаль відносно води подолає плавець?
- З якою початковою швидкістю треба кинути м'яч з висоти h , щоб він відскочив на висоту $2h$? Удар пружний. Опором повітря знехтувати.

7. Вільнопадаюче тіло пройшло останні 30 м за час 0.5 с. Знайти висоту падіння. ($\mathcal{V}_{поч}=0$)
8. Тіло, кинуте із землі вертикально вгору, впало через 8 с. Знайти, на яку висоту воно піднялося і яка була його початкова швидкість.
9. З поверхні довгої рівної гори, нахиленої під кутом $\alpha=30^\circ$ до горизонту, кинули камінець у горизонтальному напрямі зі швидкістю $\mathcal{V}_0=20$ м/с. Визначити час t польоту камінця.
10. Тіло кинуте зі швидкістю $\mathcal{V}=14,7$ м/с під кутом $\alpha=30^\circ$ до горизонту. Знайти нормальне і тангенціальне прискорення тіла через $t=1,25$ с після початку руху. Опір повітря не враховувати.
11. Колесо, обертаючись рівносповільнено, при гальмуванні зменшило свою частоту за 1 хв з 300 до 180 об/хв. Знайти кутове прискорення колеса і число обертів, зроблених ним за цей час.
12. Точка рухається по колу радіусом $R=1$ см з постійним тангенціальним прискоренням a_t . Знайти нормальне прискорення a_n точки через $t=20$ с після початку руху, якщо відомо, що до кінця п'ятого оберту після початку руху лінійна швидкість точки рівна $\mathcal{V}=10$ см/с.
13. Точка рухається по колу радіусом $R=2$ см. Залежність шляху від часу дається рівнянням $s=Ct^3$, де $C=0,1$ см/с³. Знайти нормальне і тангенціальне прискорення точки в момент, коли лінійна швидкість точки $\mathcal{V}=0,3$ м/с.
14. Колесо обертається з постійним кутовим прискоренням $\varepsilon=2$ рад/с². Через $t=0,5$ с після початку руху повне прискорення колеса стало рівне $a=13,6$ см/с². Знайти радіус колеса.
15. Колесо радіусом $R=10$ см обертається так, що залежність лінійної швидкості точок, які лежать на ободі колеса, від часу дається рівнянням $\mathcal{V}=A+Bt$, де $A=3$ см/с² і $B=1$ см/с³. Знайти кут, що складає вектор повного прискорення з радіусом колеса в моменти часу $t=0,1,2,3,4$ і 5 с після початку руху.
16. Визначити висоту башти, коли відомо, що тіло, яке падає з неї без початкової швидкості, проходить першу половину шляху за $t=1$ с.
17. μ -мезони космічних променів народжуються у верхніх шарах атмосфери. При швидкості $\mathcal{V}=0,995 \cdot c$ вони встигають пролетіти до розпаду $l=6 \cdot 10^3$ м. Знайдіть: 1) час життя μ -мезона, для спостерігача на Землі; 2) власний час τ_0 життя μ -мезона; 3) власну довжину шляху l_0 , що пройшов μ -мезон до розпаду.
18. Ракета рухається відносно нерухомого спостерігача зі швидкістю $\mathcal{V}=0,99 \cdot c$. Як зміняться лінійні розміри l_0 тіл у ракеті для нерухомого спостерігача?
19. Ракета рухається відносно нерухомого спостерігача зі швидкістю $\mathcal{V}=0,99 \cdot c$. Як зміниться густина речовини ρ в ракеті для нерухомого спостерігача?
20. Ракета рухається відносно нерухомого спостерігача зі швидкістю $\mathcal{V}=0,99 \cdot c$. Який час τ пройде за годинником нерухомого спостерігача, якщо для спостерігача в ракеті $\tau_0=1$ рік?
21. Власний час життя μ -мезона $\tau_0=2,21 \cdot 10^{-6}$ с. Знайти, чи прилітають μ -мезони, що спостерігаються біля поверхні Землі зі світового простору, чи народжуються в земній атмосфері. Швидкість μ -мезона відносно Землі прийняти рівною $\mathcal{V}=0,99 \cdot c$.
22. Каструля ємністю 2 л доверху заповнена водою. В неї ставлять тіло об'ємом 0.5 л і масою 0.6 кг. Скільки води витече з каструлі?
23. Тіло знаходиться на горизонтальному диску, що обертається, на відстані $l=4$ см від осі обертання. Коефіцієнт тертя між поверхнями тіла і диска $k=0,2$. При якій кутовій швидкості обертання тіло почне сповзати з диска?

24. Яка повинна бути прикладена сила, щоб тіло масою 0.3 кг зі стану спокою за 5 с пройшло шлях 25 м?
25. Горизонтальний диск обертається навколо вертикальної осі і робить $n=30$ об/хв. На відстані $R=20$ см від осі обертання на диску лежить тіло. Яким повинен бути коефіцієнт тертя, щоб тіло не злетіло з диска?
26. Автомобіль “Москвич-412” масою 10^3 кг рухається зі швидкістю 36 км/год по опуклому мосту. Траєкторія руху автомобіля є дугою кола радіусом 50 м. Визначити вагу автомобіля у верхній точці моста.
27. З яким прискоренням a трактор веде причіп, якщо опір руху дорівнює $F_c=1.5$ кН, маса причепа $m=0.5$ т, а сила тяги на гаку трактора $F_T=1.6$ кН?
28. На скільки годинник йтиме уперед за добу при $t_0=0^\circ\text{C}$, якщо він вивірений при $t=20^\circ\text{C}$, а матеріал, з якого зроблено маятник, має коефіцієнт лінійного розширення $\alpha=0.000012$ $1/^\circ\text{C}$?
29. Тіло масою 50 г, прикріплене до пружини завдовжки 10 см, обертається в горизонтальній площині. При якому числі обертів за хвилину пружина видовжиться на 5 см, якщо її жорсткість дорівнює 300 Н/м?
30. На краю диска, що обертається навколо вертикальної осі, є кубик. При якому мінімальному числі обертів диска кубик злетить з нього? Коефіцієнт тертя кубика об диск 0.2; діаметр диска 40 см.
31. Залізна деталь у воді важить 1.67 Н. Знайти її об'єм. Густина заліза 7.8 г/см³.
32. Прямокутна герметично закрита коробка з бляхи масою $m=76$ г, площиною дна $S=38$ см² і висотою $H=6$ см плаває у воді. Знайти висоту надводної частини коробки.
33. Між кам'яними нерухомими стінами щільно розміщено сталевий брус при $t_0=0^\circ\text{C}$. Яка стискаюча напруга σ виникне в матеріалі бруса, якщо температура збільшиться до $t_1=25^\circ\text{C}$?
34. Літак описує “мертву петлю” у вертикальній площині. Знайти силу тиску пілота масою $m=80$ кг на сидіння у верхній точці траєкторії, якщо швидкість літака в цій точці $\mathcal{V}=720$ км/год, а радіус мертвої петлі $R=1200$ м.
35. Автомобіль масою 1 т рухається з гори зі схилом 5 м на кожні 100 м шляху при вимкненому двигуні з постійною швидкістю. Яку потужність повинен розвивати двигун цього автомобіля, щоб вгору з цим же схилом автомобіль рухався зі швидкістю 54 км/год.
36. На прямій, що з'єднує Землю і Місяць, знайти точку, в якій рівнодіюча сила притягання Землі і Місяця рівна нулю. Віддаль між Землею і Місяцем – 60 земних радіусів R , а маса Землі в 81 раз більша за масу Місяця.
37. Яку роботу здійснює рівнодіюча всіх сил при розгоні автомобіля масою 5 т зі стану спокою до швидкості 36 км/год на горизонтальній ділянці шляху?
38. Свинцева гиря падає на Землю і вдаряється об перешкоду. Швидкість при ударі $\mathcal{V}=330$ м/с. Визначити, яка частина гирі розплавиться, якщо вся теплота при ударі поглинається гирею. Температура гирі перед ударом 27°C , температура плавлення свинцю 327°C , питома теплоємність свинцю $c=125.7$ Дж/(кг·град) і питома теплота плавлення $\lambda=26.4 \cdot 10^3$ Дж/кг.
39. На нерухому кулю налігає куля масою $m=0.25$ кг і зупиняється. Визначити середню силу взаємодії куль, якщо час співударяння $t=0.010$ с, а швидкість рухомої кулі $\mathcal{V}=5$ м/с.
40. Санки рухаються прямолінійно і рівномірно по горизонтальній ділянці дороги. Яку роботу виконує сила 50 Н, прикладена до шнурка, при переміщенні санок на 100 м, якщо шнурок тягнеться під кутом 30° до горизонтальної площини.

41. Є дві пружини. Одна з них під дією сили 3000 Н видовжилася на 6 см, а друга під дією сили 1000 Н видовжилася на 2 см. Яка з пружин має більшу жорсткість?
42. Санки масою 5 кг тягнули горизонтально з силою 20 Н протягом 5 с. Коефіцієнт тертя між санками і дорогою 0.3. Який шлях пройдуть санки до повної зупинки?
43. На ковзанці два хлопчики, маси яких 40 і 60 кг, стоять на ковзанах. Перший хлопчик відштовхується від другого з силою 10 Н. Яких прискорень при цьому набувають хлопчики? Яке прискорення першого хлопчика відносно другого?
44. З якою силою притягувалася б до Землі людина масою 80 кг, якби вона перебувала від центру Землі на відстані, що дорівнює 60 земних радіусів?
45. Шосе має віраж з нахилом 10° при радіусі заокруглення дороги в 100 м. На яку максимальну швидкість розраховано віраж?
46. Куля масою 1 кг на тонкій нитці довжиною 1 м здійснює вільні коливання, максимальний кут відхилення нитки від вертикального положення 5° . Знайти силу пружності нитки при проходженні кулею положення рівноваги.
47. Після припинення тяги локомотива поїзд зупинився на горизонтальній ділянці шляху через 60 с. Знайдіть шлях, який пройшов поїзд за цей час, якщо відомо, що сила опору руху не залежить від швидкості й складає 2% ваги всього поїзда.
48. Людина масою 70 кг піднімається по драбині довжиною 20 м на висоту 10 м. Яку роботу виконує при цьому сила тяжіння?
49. Чи здійснює роботу рівнодіюча всіх сил, прикладених до тіла, що рівномірно рухається по колу?
50. Стальний трос жорсткістю $5 \cdot 10^8$ Н/м розтягнуто на 2 мм. Обчислити потенціальну енергію пружної деформації троса.
51. Велосипедист повинен проїхати по треку, що має форму “мертвої петлі”, радіус якої $R=8$ м. З якої висоти він повинен почати розгін, щоб не впасти у верхній точці петлі при умові, що він не крутить педалі?
52. Суцільне однорідне тіло, густина матеріалу якого ρ , плаває на межі між тяжкою рідиною з густиною ρ_1 і легшою рідиною з густиною ρ_2 . Яка частина об'єму тіла буде знаходитися в тяжчій рідині?
53. Літак з реактивним двигуном летить із швидкістю $\mathcal{V}=1000$ км/год. Вважаючи, що людина може переносити п'ятикратне збільшення ваги, знайти, який найменший радіус кривизни можна допустити на віражі.
54. Куля пробиває дошку товщиною 2 см. Швидкість кулі до влучання в дошку $\mathcal{V}=500$ м/с, а після вильоту з неї $\mathcal{V}_1=100$ м/с. Визначити прискорення кулі при проходженні через дошку і скільки часу вона рухається всередині дошки? Рух кулі вважається рівносповільненим.
55. Тіло масою $m=1.5$ кг, кинуте вертикально вгору з висоти $h=4.9$ м зі швидкістю $\mathcal{V}_0=6$ м/с, впало на землю зі швидкістю $\mathcal{V}=5$ м/с. Знайти роботу сил опору повітря.
56. На гладкому столі лежать два зв'язаних ниткою вантажі: $m_1=0.2$ кг і $m_2=0.3$ кг. До них прикладена сила $F_1=0.6$ Н і $F_2=1$ Н. З яким прискоренням рухаються вантажі і яка сила натягу з'єднуючої нитки? Тертям знехтувати.
57. Дві кулі однакового радіуса і з одного із того ж матеріалу, але одна – суцільна, масою m_1 , а друга – порожниста, масою m_2 , падають у повітрі з однакової висоти. Яка з куль впаде раніше? Чому? Проаналізувати всі варіанти.
58. Кулька масою $m=50$ г обертається на гумовому шнурі, роблячи $n=180$ об/хв. На скільки розтягується шнур при обертанні? Розтяг вважати пропорційним прикладеній силі, під дією 9.8 Н шнур розтягується на 1 см. Довжина шнура в нерозтягнутому стані $l=30$ см.

59. На горизонтальному диску на відстані $R=0.5$ м від осі обертання лежить тіло масою $m=1$ кг. Коефіцієнт тертя ковзання між тілом і диском $\mu=0.25$. Яка сила тертя утримує тіло на диску, якщо диск робить $\nu=12$ об/хв?
60. Тіло масою $m=1$ кг сповзає вниз по похилій площині довжиною $l=21$ м, яка утворює з горизонтом кут $\alpha=30^\circ$. Швидкість тіла біля основи похилої площини дорівнює $\nu=4.1$ м/с. Обчислити кількість теплоти, що виділяється при терті тіла об площину, якщо початкова швидкість тіла дорівнює нулю.

Молекулярна фізика та термодинаміка

61. В міжзоряному просторі знаходиться ~ 1 атом водню в 1 см^3 , температура газу 125 К . Визначити тиск міжзоряного газу.
62. Скільки молекул води міститься в 1 см^3 її об'єму? Молярна маса води $18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, густина води 10^3 кг/м^3 , число Авогадро $6.02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$.
63. У кімнаті об'ємом $V=90 \text{ м}^3$ температура повітря за день підвищилася від $T_1=290 \text{ К}$ до $T_2=300 \text{ К}$. Наскільки змінилася маса повітря в кімнаті, якщо атмосферний тиск увесь час залишався сталим і дорівнював $p=9.8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$.
64. Яка маса повітря потрібна для заповнення камери шини автомобіля "Москвич", якщо об'єм камери $V=12 \text{ л}$? Заповнення камери здійснюється при $t=27^\circ\text{C}$ до тиску $p=2.2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$.
65. Накреслити ізотерми $0,5 \text{ г}$ водню для температур: 1) 0°C , 2) 100°C .
66. Циліндрична посудина поділена на дві частини рухомих поршнем. Яким буде рівноважне положення поршня, коли в одну частину посудини вміщено деяку вагову кількість кисню, в другу – таку ж кількість водню, якщо спільна довжина посудини дорівнює $l=85 \text{ см}$?
67. Знайти питомі теплоємності c_V і c_p деякого двоатомного газу, якщо відомо, що молярна маса цього газу рівна $\mu=0,03 \text{ кг/моль}$ і відношення $c_p/c_V=1,4$.
68. Яку кількість теплоти треба надати 12 г кисню, щоб нагріти його на 50°C при постійному тиску?
69. В закритій посудині об'ємом $V=2 \text{ л}$ знаходиться азот, густина якого $\rho=1,4 \text{ кг/м}^3$. Яку кількість теплоти Q треба надати азоту, щоб нагріти його в цих умовах на $\Delta t=100^\circ\text{C}$?
70. Знайти середню довжину вільного пробігу молекул азоту при температурі 17°C і тиску 10 кПа .
71. В циліндрі, площа основи якого дорівнює 100 см^2 , знаходиться повітря при температурі 285 К . На висоті 38 см від основи циліндра розміщено поршень, на якому знаходиться гиря масою 100 кг . Яку роботу повинно здійснити повітря, якщо його нагріти до 300 К ? Атмосферний тиск нормальний. Тертям і масою поршня знехтувати.
72. Дві посудини – циліндрична й у формі зрізаного конуса – мають рівні основи. В посудини налито однакову кількість води. В якій з посудин вода з більшою силою тисне на дно? Чому дорівнює сила тиску посудин з рідиною на стіл?
73. У результаті отримання кількості теплоти 800 Дж повітря в циліндрі розширилося і здійснило роботу 200 Дж . Як змінилася при цьому внутрішня енергія повітря?
74. За 10 діб повністю випаровувалося зі склянки 100 г води. Скільки в середньому вилітало молекул з поверхні води за 1 с ?
75. До якої температури можна нагріти повітря, взяте при 20°C , щоб його об'єм подвоївся, якщо тиск залишається незмінним?

76. Як зміниться об'єм бульбашки повітря при спливанні її з дна озера глибиною 20 м до поверхні води? Температура води поблизу дна і поверхні однакова. Атмосферний тиск прийняти рівним 10^5 Па.
77. В калориметрі знаходиться 0.5 кг води при температурі 10°C . У воду поклали 1 кг льоду при температурі -30°C . Яка температура встановиться в калориметрі, якщо його теплоємністю можна знехтувати?
78. Якщо тиск, під яким знаходиться газ, змінити на 200 Па, то об'єм газу зміниться на 3 л. Якщо тиск змінити на 500 Па, об'єм зміниться на 5 л. Якими були початкові об'єм та тиск газу? Температура газу під час досліду не змінювалася.
79. Рамка, що охоплює поверхню 40 см^2 , зтягнута мильною плівкою. Наскільки зменшиться енергія плівки при скороченні її площі вдвоє? Температура постійна.
80. При якій температурі знаходився газ, якщо при нагріванні його на $\Delta t^\circ=22^\circ\text{C}$ при постійному тиску об'єм подвоївся? Для яких газів це можливо?
81. У котел об'ємом 5 м^3 накачали 20 кг води і потім нагріли котел з водою до 180°C . Визначити масу і тиск пари в котлі. Густина насиченої пари води при 180°C дорівнює $\rho=5.05\text{ кг/м}^3$.
82. У дві посудини конічної форми, що розширюються догори й донизу, і циліндричну налита вода при температурі $t=100^\circ\text{C}$. Як зміниться тиск на дно посудин після охолодження води до кімнатної температури?
83. Газ у циліндрі охолоджується при сталому об'ємі. Визначити кінцеву температуру газу і виконану ним роботу, якщо початкова температура 227°C , а тиск газу змінюється від $0.5\cdot 10^6$ Па до $0.3\cdot 10^6$ Па.
84. Який тиск на стінки посудин створював би ідеальний газ концентрацією 100 мільярдів молекул у кубічному міліметрі при середній квадратичній швидкості руху молекул 1 км/с і масі молекул $3\cdot 10^{-27}\text{ кг}$?
85. Азот займає об'єм 2.5 л при тиску 100 кПа. На скільки зміниться внутрішня енергія газу при його стисканні до об'єму 0.25 л, якщо тиск газу збільшився при цьому в 20 разів? Молярна теплоємність азоту при постійному об'ємі $C_V=20.8\cdot 10^3\text{ Дж/(кмоль}\cdot\text{град)}$.
86. Суміш, що складається з 5 кг льоду і 15 кг води при загальній температурі 0°C потрібно нагріти до 80°C пропусканням водяної пари при 100°C . Визначити необхідну кількість пари. Питома теплоємність води $4.19\cdot 10^3\text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$, питома теплота пароутворення води $2.26\cdot 10^6\text{ Дж/кг}$, питома теплота плавлення льоду $3.35\cdot 10^5\text{ Дж/кг}$.
87. При температурі 27°C і тиску 10^5 Па об'єм повітряної кулі, заповненої гелієм, дорівнює 500 м^3 . Яким буде об'єм цієї кулі, якщо при підйомі у верхні шари атмосфери температура знизиться до -33°C , а тиск стане $5\cdot 10^4$ Па? Масу гелію вважати постійною.
88. Дві лінійки – одна мідна, друга залізна – накладені одна на одну так, що вони співпадають тільки одним кінцем. Визначити довжину лінійок при $t=0^\circ\text{C}$, знаючи, що різниця їх довжин при будь-якій температурі складає $\Delta l=10\text{ см}$. Коефіцієнт лінійного розширення міді $\alpha_1=17\cdot 10^{-6}\text{ 1/}^\circ\text{C}$, заліза - $\alpha_2=12\cdot 10^{-6}\text{ 1/}^\circ\text{C}$.
89. Гумовий м'яч містить $V=2$ л повітря, яке знаходиться при $t_1=20^\circ\text{C}$ під атмосферним тиском $p=10^5\text{ Н/м}^2$. Який об'єм займе повітря, якщо м'яч опустити у воду на глибину $h=10$ м? Температура води $t_2=4^\circ\text{C}$.
90. У воді на глибині $h_1=1$ м знаходиться бульбашка повітря. На якій висоті h_2 ця бульбашка повітря матиме втричі менший об'єм? Атмосферний тиск $p_0=10^5\text{ Н/м}^2$, густина води $\rho=10^3\text{ кг/м}^3$, прискорення вільного падіння $g=9.8\text{ м/с}^2$.

91. Теплова машина періодичної дії має к.к.д. $\eta=40\%$. В результаті удосконалення її, кількість теплоти, одержаної від нагрівника за цикл, залишилась без змін, а кількість теплоти, що віддається за цикл холодильнику, зменшилася на 10%. Яким став к.к.д. машини?
92. Ідеальна теплова машина працює за циклом Карно. При цьому 80% теплоти, одержуваної від нагрівника, передається холодильнику, температура якого 0°C . Визначити температуру нагрівника і коефіцієнт корисної дії машини.
93. Якою повинна бути температура нагрівника для того, щоб стало можливим досягнення максимального значення ККД теплової машини 80% при температурі холодильника 300 K ?
94. Ідеальна теплова машина має корисну потужність 73.5 кВт і працює в температурному інтервалі від 273 до 373 K . Знайти: а) енергію, яку отримує машина від нагрівача за 1 год.; б) енергію, яку віддає холодильник за 1 годину.
95. Теплова машина за цикл здійснює роботу 500 Дж і отримує від нагрівника кількість теплоти 1500 Дж . Обчислити ККД машини.
96. Обчислити максимальне значення ККД теплової машини з температурою нагрівника 427°C і температурою холодильника 27°C .
97. Авіаційний чотиритактний 18-циліндровий бензиновий двигун робить 2400 об/хв. Визначити хід поршня в циліндрі, якщо діаметр його дорівнює 14 см , механічний коефіцієнт корисної дії двигуна 74.5% , середній тиск у циліндрі $2.2 \cdot 10^6\text{ Н/м}^2$ і ефективна потужність двигуна 1582.4 кВт .
98. У циліндрі під невагомим поршнем міститься $V_1=10\text{ л}$ повітря при $t_1=57^\circ\text{C}$ під тиском $p_1=9.6 \cdot 10^4\text{ Н/м}^2$. Визначити об'єм повітря після занурення циліндрів у воду на глибину $h=4.2\text{ м}$, де температура води $t_2=7^\circ\text{C}$.
99. Тонке алюмінієве кільце радіусом $r=7.8\text{ см}$ і вагою $P=7 \cdot 10^{-2}\text{ Н}$ дотикається до розчину мила. Яке зусилля необхідно прикласти, щоб відірвати кільце від розчину, враховуючи, що поверхневий натяг $\sigma=0.04\text{ Н/м}$?
100. В запаяній трубці об'ємом $V=0.4\text{ л}$ знаходиться водяна пара під тиском $p_1=8.0\text{ кПа}$ при температурі $t_1=150^\circ\text{C}$. Яка кількість роси m_x випаде на стінках трубки при охолодженні її до $t_2=22^\circ\text{C}$. Тиск насичуючих парів води при $t_2=22^\circ\text{C}$ дорівнює: $p_2=25.32\text{ кПа}$.
101. В калориметр з $m=100\text{ г}$ льоду при $t=0^\circ\text{C}$ впущено пару при 100°C . Скільки води опиниться в калориметріразу після того, як увесь лід розтане? Питома теплота плавлення льоду $\lambda=3.3 \cdot 10^5\text{ Дж/кг}$. Теплоємністю калориметра знехтувати. Питома теплоємність пароутворення води $2.26 \cdot 10^6\text{ Дж/кг}$, питома теплоємність $0.5\text{ кал/(г}\cdot\text{град)}$.
102. Яка кількість енергії звільняється від злиття дрібних водяних крапель радіусом $r_1=2 \cdot 10^{-3}\text{ мм}$ в одну велику краплю $r_2=2\text{ мм}$. Коефіцієнт поверхневого натягу води $\alpha=7.4 \cdot 10^{-2}\text{ Н/м}$.
103. В посудину, заповнену повітрям, вміщено порожнисту сталю кульку радіусом $r=2\text{ см}$, що має вагу 49.1 мН . Який тиск повітря необхідно створити в посудині, вважаючи, що і при високому тиску повітря є ідеальним газом, щоб кулька піднялася вгору? Процес стискання вважати ізотермічним, що протікає при температурі 20°C .
104. На скільки збільшиться об'єм мідної кульки при нагріванні до 100°C , якщо при $t=0^\circ\text{C}$ її діаметр дорівнював 200 мм ? ($\alpha_{Cu}=1.6 \cdot 10^{-5}\text{ град}^{-1}$)
105. Знайти витрати бензину автомобіля "Запорожець" на $s=1\text{ км}$ шляху при швидкості $\mathcal{S}=60\text{ км/год}$. Потужність двигуна $N=23\text{ к.с.}$, коефіцієнт корисної дії двигуна $\eta=30\%$. Теплотворна здатність бензину $q=45 \cdot 10^6\text{ Дж/кг}$.

106. Деяка установка, що виділяє потужність $N=30$ кВт, охолоджується проточною водою, яка тече по спіральній трубці діаметром $d=15$ мм. При стаціонарному режимі проточна вода нагріється на $\Delta t=15^\circ\text{C}$. Знайти швидкість води, якщо вся потужність установки, яка виділяється, йде на нагрівання води.

Коливання і хвилі

107. Через скільки часу від початку руху точка, що здійснює гармонічні коливання, зміститься від положення рівноваги на половину амплітуди? Період коливань рівний 24 с, початкова фаза рівна нулю.
108. Через скільки часу від початку руху точка, що здійснює коливальний рух по рівнянню $x=7\sin 0,5\pi t$, проходить шлях від положення рівноваги до максимального зміщення?
109. Точка здійснює гармонійне коливання. Період коливань 2 с, амплітуда 50 мм, початкова фаза рівна нулю. Знайти швидкість точки у момент часу, коли зміщення точки від положення рівноваги рівне 25 мм.
110. Точка бере участь одночасно в двох взаємно перпендикулярних коливаннях: $x=\cos \pi t$ і $y=\cos(\pi/2)t$. Знайти траєкторію результуючого руху точки.
111. Математичний маятник здійснює затухаючі коливання з логарифмічним декрементом затухання 0,2. У скільки разів зменшиться повне прискорення маятника в його крайньому положенні за одне коливання?
112. Амплітуда затухаючих коливань математичного маятника за 1 хв зменшилася вдвічі. У скільки разів вона зменшиться за 3 хв?
113. Знайти різницю фаз коливань двох точок, що знаходяться на відстані відповідно 10 і 16 м від джерела коливань. Період коливань 0,04 с, швидкість поширення 300 м/с.
114. Знайти різницю фаз коливань двох точок, що лежать на промені і віддалених на відстані 2 м один від одного, якщо довжина хвилі 1 м.
115. У скільки разів треба зменшити довжину математичного маятника для того, щоб період його коливань зменшився в 3 рази?
116. Катер, рухаючись по озеру, утворив хвилю, яка дійшла до берега через 1 хв. Відстань між двома сусідніми горбами хвилі 1,5 м, а проміжок часу між двома послідовними ударами об берег 2 с. Яка відстань від берега до катера, що проходив?
117. Швидкість звуку у воді 1450 м/с. На якій відстані знаходяться найближчі точки, які здійснюють коливання в протилежних фазах, якщо частота коливань дорівнює 725 Гц?
118. Мідна кулька, підвішена до пружини, здійснює вертикальні коливання. Як зміниться період коливань, якщо до пружини підвісити алюмінієву кульку такого ж радіуса? Густина міді $8,9 \cdot 10^3$ кг/м³, алюмінію – $2,7 \cdot 10^3$ кг/м³.
119. До пружини підвішена чашка з гирями. Період вертикальних коливань чашки дорівнює 0,1 с. Після того, як на чашку поклали додаткові гирки, період вертикальних коливань став 0,3 с. На скільки видовжилась пружина від додаткового вантажу?
120. Радіосигнал, що послали на Місяць, відбився і був прийнятий на Землі через 2,5 с. Знайти віддаль від Землі до Місяця за час локації. Швидкість поширення сигналу $c=3 \cdot 10^8$ м/с.
121. При якій швидкості поїзда маятник довжиною $l=11$ см, підвішений у вагоні, особливо сильно розгойдується, якщо довжина рейок 12,5 м?
122. Визначити глибину, на якій знаходиться косяк риби, якщо проміжок часу між прийомом сигналу ультразвуковим ехолотом, відбитих від косяка і дна моря,

дорівнює $t=2.5$ с, а глибина моря $H=2$ км. Швидкість поширення звуку у воді $\mathcal{V}=1500$ м/с.

123. Пружинний маятник здійснює гармонічні коливання амплітудою $A=6.0$ см. Визначити зміщення кульки за час $\tau=5.2 \cdot 10^{-2}$ с з початку коливань, враховуючи, що початкова фаза дорівнює нулю, маса кульки $m=1.47$ Н, коефіцієнт жорсткості пружини $k=15$ Н/м. Затуханням знехтувати.
124. Яка глибина моря, якщо сигнал ультразвукового ехолота повернувся через 0,40 с після виходу? Швидкість поширення ультразвукових хвиль прийняти рівною 1500 м/с.

Електростатика. Електродинаміка

125. Побудувати графік залежності сили взаємодії між двома точковими зарядами від відстані між ними в інтервалі $2 \leq r \leq 10$ см через кожні 2 см. Заряди рівні відповідно $2 \cdot 10^{-8}$ і $3 \cdot 10^{-8}$ Кл.
126. Побудувати графік залежності електростатичної енергії двох точкових зарядів від відстані між ними в інтервалі $2 \leq r \leq 10$ см через кожні 2 см. Заряди $q_1=10^{-9}$ Кл і $q_2=3 \cdot 10^{-9}$ Кл; $\epsilon=1$ Графік побудувати для випадків: 1) заряди однойменні, 2) заряди різнойменні.
127. Кільце з дроту радіусом $R=10$ см було заряджене негативно і несе заряд $q=-5 \cdot 10^{-9}$ Кл. 1. Знайти напруженість електричного поля на осі кільця в точках, розміщених від центру кільця на відстані L , рівному 0, 5, 8, 10 і 15 см. Побудувати графік $E=f(L)$. 2. На якій відстані L від центру кільця напруженість електричного поля буде максимальною?
128. Потенціал іонізації атома ртуті $\phi=10.4$ В. Яку найменшу швидкість \mathcal{V} повинен мати електрон, щоб іонізувати атом ртуті при ударі?
129. Від'ємний точковий заряд $-5q$ і додатний $+2q$ закріплені на віддалі r один від одного. Де (на лінії, що з'єднує ці заряди) необхідно розмістити додатний заряд q_1 , щоб він знаходився в рівновазі?
130. При якій напрузі загоряється неоновая лампочка, якщо відстань між електродами, що мають вигляд тонких пласких пластин, d ; енергія іонізації неону W_i ; довжина вільного пробігу електронів між двома послідовними зіткненнями з атомами неону l ? Заряд електрона дорівнює e .
131. При радіоактивному розпаді з ядра атома полонію вилітає α -частинка з швидкістю $1,6 \cdot 10^9$ см/с. Знайти кінетичну енергію цієї α -частинки і різницю потенціалів поля, в якому можна розігнати α -частинку, що покоїться, до такої ж швидкості.
132. У плоскому горизонтально розташованому конденсаторі, відстань між пластинами якого $d=1$ см, перебуває заряджена крапля масою $m=5 \cdot 10^{-11}$ г. За відсутності електричного поля крапля внаслідок опору повітря падає з деякою постійною швидкістю. Якщо до пластин конденсатора була прикладена різниця потенціалів $U=600$ В, то крапля падали вдвічі повільніше. Знайти заряд краплі.
133. Заряджена куля А радіусом 2 см приводиться в зіткнення із незарядженою кулею В, радіус якої 3 см. Після того, як кулі роз'єднали, енергія кулі В виявилася рівною 0,4 Дж. Який заряд був на кулі А до їх зіткнення?
134. Знайти напруженість електричного поля в точці, що лежить посередині між точковими зарядами $q_1=8 \cdot 10^{-9}$ Кл і $q_2=-6 \cdot 10^{-9}$ Кл. Відстань між зарядами $r=10$ см, $\epsilon=1$.

135. Три конденсатори ємністю 1 мкФ, 2 мкФ і 3 мкФ з'єднані послідовно і під'єднані до джерела напруги з різницею потенціалів 220 В. Знайти величину заряду і напругу на кожному конденсаторі.
136. На пластинках повітряного конденсатора електроємністю 500 пФ знаходяться різнойменні електричні заряди по 10^{-9} Кл. Чому дорівнює напруга між пластинками? Якою стане напруга між пластинками, якщо заряд залишиться тим самим, а відстань між ними збільшиться в два рази?
137. Дві заряджені металеві кулі однакового діаметра дотикаються. Одна із них пустотіла. Чи порівну розподіляться на них заряди?
138. Пластини плоского конденсатора площею 100 см^2 кожна притягуються одна до одної з силою $3 \cdot 10^{-3}$ кгс. Простір між пластинами був заповнений слюдою. Знайти: 1) заряди, що перебувають на пластинах, 2) напруженість поля між пластинами, 3) енергію в одиниці об'єму поля.
139. Яка кількість електронів повинна проходити за одиницю часу через поперечний переріз провідника, щоб струм дорівнював 1 мА?
140. Знайти середню потужність, що виділяється на активному опорі в колі змінного струму при амплітудному значенні сили струму 2 А і амплітудному значенні напруги 310 В.
141. Знайти активний опір електричної лампи розжарення, ввімкненої в коло змінного струму з діючою напругою 220 В, при цьому виділяється середня потужність 100 Вт.
142. Елемент з е.р.с. 1.1 В і внутрішнім опором 1 Ом замкнено на зовнішній опір 9 Ом. Знайти: 1) силу струму в колі; 2) спад потенціалу в зовнішньому колі; 3) спад потенціалу всередині елемента; 4) з яким к.к.д. працює елемент?
143. Маємо три електричні лампи, розраховані на напругу 110 В кожна, потужності яких рівні 40, 40 і 80 Вт. Як потрібно ввімкнути ці лампи, щоб вони давали нормальне розжарення при напрузі в мережі 220 В? Знайти силу струму, що тече через лампи при нормальному розжаренні. Намалуйте схему.
144. Гальванічний елемент, амперметр і деякий опір ввімкнені послідовно. Опір зроблено з мідного дроту довжиною 100 м і поперечним перерізом 2 мм^2 , опір амперметра 0.05 Ом; амперметр показує 1.43 А. Якщо ж взяти опір з алюмінієвого дроту довжиною 57.3 м і поперечним перерізом 1 мм^2 , то амперметр покаже 1 А. Знайти е.р.с. елемента і його внутрішній опір. $\rho_{\text{Cu}}=1.7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\rho_{\text{Al}}=2.53 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.
145. Дві однакові кульки масою m кожна підвішені в одній точці на нитках довжиною l . Після того, як їх однаково зарядили, кульки розійшлися на кут α . Знайти заряди кульок.
146. Через заповнену повітрям газорозрядну трубку йде струм насичення 10^{-6} А. Яка кількість іонів Δn створюється іонізатором за одиницю часу в просторі між електродами?
147. Два споживачі з опорами R_1 і R_2 під'єднані до мережі напругою U один раз паралельно, а другий – послідовно. В якому випадку споживається більша потужність від мережі. Окремо розглянути випадок: $R_1=R_2$.
148. Елемент замикають спочатку на зовнішній опір $R_1=2 \text{ Ом}$, а потім – на зовнішній опір $R_2=0.5 \text{ Ом}$. Знайти е.р.с. елемента та його внутрішній опір, якщо відомо, що в кожному з цих випадків потужність, яка виділяється в зовнішньому колі, однакова і дорівнює 2.54 Вт.
149. На скільки рівних частин потрібно розрізати провідник, щоб при паралельному з'єднанні цих частин отримати опір в n разів менший?
150. У коло генератора ввімкнені послідовно два опори: $R_1=200 \text{ Ом}$ і $R_2=1000 \text{ Ом}$. До кінців другого опору (1000 Ом) підключено вольтметр. Чому дорівнює опір

вольтметра, якщо він показує 160 В? Е.р.с. генератора 200 В, його опором можна знехтувати.

151. Маленькі однакові краплі ртуті заряджені однойменно до потенціалу φ_0 кожна. Знайти потенціал більшої краплі, що утвориться від з'єднання n маленьких крапель.
152. Маємо котушку мідного дроту площею поперечного перерізу 0.1 мм^2 . Маса всього дроту 0.3 кг. Знайти опір дроту. Питомий опір міді $\rho_{Cu}=1.7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Густина міді $8.9 \text{ кг}/\text{см}^3$.
153. Яку напругу потрібно прикласти до котушки, що має $n=1000$ витків мідного дроту середнім діаметром витків $d=6 \text{ см}$, якщо допустима густина струму $j=2 \text{ А}/\text{мм}^2$; питомий опір міді $\rho=1.75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$?
154. Скільки часу необхідно для нагрівання води масою 2 кг від початкової температури 10°C до кипіння в електричному чайнику з електричним нагрівачем потужністю 1 кВт, якщо його ККД рівний 90%? Яка сила струму в електричній спіралі нагрівача, якщо напруга дорівнює 220 В?
155. Виток дроту площиною $2.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ обертається з частотою 5 с^{-1} в однорідному магнітному полі індукцією 1.1 Тл. Знайти амплітуду коливань ЕРС індукції у витку.
156. В короткозамкнену котушку один раз швидко, другий – повільно засувають магніт: а) чи однакова кількість електрики пройде через котушку в першому і другому випадках; б) чи однакову роботу проти електромагнітних сил здійснила сила, що рухає магніт?
157. Знайти зміну магнітного потоку $\Delta\Phi$ через котушку, якщо вона має $N=2000$ витків, за час $t=0.01 \text{ с}$ виникає е.р.с. індукції $\mathcal{E}_{ind}=200 \text{ В}$.
158. В однорідному магнітному полі розміщено виток, площа якого дорівнює $S=50 \text{ см}^2$. Перпендикуляр до площини витка складає з напрямком магнітного поля кут, рівний $\alpha=60^\circ$. Індукція магнітного поля $B=0.2 \text{ Тл}$. Чому дорівнює середнє значення е.р.с. індукції \mathcal{E}_{ind} , що виникає у витку при вимкненні поля за час $\Delta t=0.02 \text{ с}$?
159. Миттєве значення е.р.с. дано виразом $50=100\sin 800\pi t$, де t виражено в секундах. Знайти амплітуду, частоту, період і фазу, коли $\mathcal{E}=50 \text{ В}$.
160. З якою швидкістю досягають анода електронної лампи електрони, випромінювані катодом, якщо напруга між катодом і анодом дорівнює 200 В? Початковою швидкістю електронів можна знехтувати.
161. Конденсатор ємністю 5 мкФ, заряджений до напруги 120 В, розряджається на котушку. Максимальна сила розрядного струму дорівнює 0.4 А. Знайти індуктивність котушки.
162. Електровоз рухається зі швидкістю 36 км/год і розвиває в середньому силу тяги 4500 Н. Визначити, який струм споживає двигун електровоза, якщо напруга на його затискачах становить 500 В, а к.к.д. 90%.
163. Електрон, що рухається зі швидкістю $5 \cdot 10^6 \text{ м}/\text{с}$, влітає в паралельне його руху електричне поле напруженістю $1 \cdot 10^3 \text{ В}/\text{м}$. Яку відстань пройде електрон в цьому полі до моменту зупинки і скільки часу йому для цього необхідно?
164. На рис. зад.-120 зображені перерізи двох прямолінійних нескінченно довгих провідників із струмом. Відстань АВ між провідниками дорівнює 10 см, $I_1=20 \text{ А}$, $I_2=30 \text{ А}$. Знайти напруженості магнітного поля, спричиненого струмами I_1 і I_2 в точках M_1 , M_2 і M_3 . Відстані $M_1A=2 \text{ см}$, $AM_2=4 \text{ см}$ і $BM_3=3 \text{ см}$.

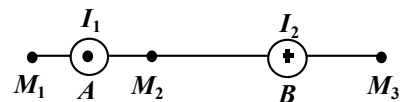


Рисунок зад.-120

- Знайти числове значення і напрямок напруженості магнітного поля в точці, що перебуває на відстані 10 см від кожного провідника.
166. З дроту завдовжки 1 м зроблена квадратна рамка. По рамці протікає струм силою 10 А. Знайти напруженість магнітного поля в центрі рамки.
167. Заряджена частинка рухається в магнітному полі по колу зі швидкістю 10^6 м/с. Індукція магнітного поля 0.3 Тл. Радіус кола 4 см. Знайти заряд частинки, якщо відомо, що її енергія дорівнює 12 кеВ.
168. У магнітному полі, індукція якого 0.05 Тл, обертається стержень довжиною 1 м. Вісь обертання, що проходить через один з кінців стержня, паралельна силовим лініям магнітного поля. Знайти потік магнітної індукції, що перетинається стержнем при кожному оберті.
169. Що станеться з власними коливаннями в контурі, активним опором якого можна знехтувати, якщо його ємність у три рази збільшити, а індуктивність – у три рази зменшити?
170. В котушці, що складається з 75 витків, магнітний потік дорівнює $4.8 \cdot 10^{-3}$ Вб. За який час повинен зникнути цей потік, щоб у котушці виникла середня е.р.с. індукції 0.74 В.
171. Магнітний потік через замкнутий провідник опором 0.5 Ом рівномірно збільшився з $2 \cdot 10^{-4}$ Вб до $10 \cdot 10^{-4}$ Вб. Який заряд пройшов через поперечний переріз провідника?
172. Контур радіоприймача налаштований на радіостанцію, частота якої $9 \cdot 10^6$ Гц. Як треба змінити ємність змінного конденсатора коливального контуру приймача, щоб він був налаштований на хвилю довжиною 50 м? Швидкість поширення електромагнітних хвиль $3 \cdot 10^8$ м/с.
173. Коливальний контур складається з котушки індуктивністю 10^{-4} Гн і конденсатора, ємність якого може змінюватися від 100 до 500 пФ. Визначити інтервал довжин хвиль, на які може бути налаштований контур. Опором контуру знехтувати. Швидкість поширення електромагнітних хвиль $3 \cdot 10^8$ м/с.
174. Приймальний контур складається з котушки індуктивністю 0.025 мГн і конденсатора змінної ємності. Яку ємність необхідно підібрати, щоб прийняти радіохвилю довжиною 300 м?
175. Коливальний контур складається з котушки індуктивністю 0.003 Гн і плоского конденсатора, який складається з двох пластин у вигляді дисків радіусом 1.2 см, розміщених на відстані 0.3 мм один від одного. Знайдіть період власних коливань уконтурі. Електрична стала $8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Оптика. Квантова, атомна, ядерна фізика

176. Сонячний промінь, що проходить крізь отвір у віконниці, створює з поверхнею стола кут 48° . Як потрібно розмістити плоске дзеркало, щоб змінити напрям променя на горизонтальний?
177. В дно ріки забито стовп. Частина його висотою 1.5 м піднімається над водою. Знайти довжину тіні стовпа на поверхні і на дні річки, якщо висота Сонця над горизонтом 60° , а глибина річки 3 м. Показник заломлення води 1.33.
178. Промінь світла падає під кутом 30° на плоскопаралельну скляну пластинку і виходить з неї паралельно початковому променю. Показник заломлення скла 1.5. Яка товщина d пластинки, якщо відстань між променями дорівнює 1.94 см?

179. Промінь світла виходить зі скипидару в повітря. Граничний кут падіння цього променя $42^{\circ}23'$. Визначити швидкість поширення світла в скипидарі. Синус $42^{\circ}23'$ дорівнює 0.67.
180. Висота Сонця над горизонтом складає $\alpha=38^{\circ}$. Під яким кутом β до горизонту необхідно розмістити дзеркало, щоб освітити сонячними променями дно вертикальної криниці?
181. Людина знаходиться на відстані 2 м від плоского дзеркала. На скільки зміниться відстань між людиною та її зображенням, якщо людина наблизиться до дзеркала на 1 м?
182. Два когерентних пучки світла довжиною хвилі $\lambda=400$ нм перетинаються. Що спостерігатиметься в точці перетину, для якої різниця ходу хвиль $l=0.5$ мм: максимум чи мінімум коливань?
183. На скляну пластинку з показником заломлення $n=1.5$ падає промінь світла. Знайти кут падіння променя i , якщо кут ϕ між відбитим і заломленим променями дорівнює $\pi/2$.
184. Людина висотою $h=1.75$ м знаходиться на відстані $l=6$ м від стовпа. На якій відстані від себе людина повинна покласти горизонтально на землю плоске дзеркало, щоб побачити в ньому вершину стовпа висотою $H=7$ м?
185. На поверхні шару тетрахлорметану товщиною 4 см налито шар води товщиною 2 см. Показники заломлення CCl_4 і води рівні відповідно 1.46 і 1.33. На якій глибині буде здаватися розташованим дно посудини, в яку наліті рідини, якщо дивитися на поверхню води під малим кутом до нормалі?
186. На поверхні озера знаходиться пліт, довжина якого 8 м, а ширина 6 м. Визначити розміри повної тіні від плоту на дні озера при освітленні поверхні води розсіяним світлом. Глибина озера 2 м. Показник заломлення води 1.33.
187. Світлова хвиля довжиною 530 нм падає перпендикулярно на прозору дифракційну решітку, період якої 1.8 мкм. Визначити, під яким кутом видно максимум з найбільшим порядком.
188. На плоску мильну плівку товщиною $d=4 \cdot 10^{-4}$ мм із показником заломлення $n=1.33$ падає нормально до її поверхні біле світло і, відбиваючись від неї, дає у видимому світлі інтерференційний максимум на хвилі довжиною $\lambda_1=530$ нм. На якій довжині хвилі λ_2 спостерігатиметься у видимому світлі ближчий до нього інтерференційний мінімум того самого порядку?
189. На дифракційну ґратку нормально до її поверхні падає монохроматичний пучок світла довжиною хвилі $\lambda=500$ нм. На відстані $l=1$ м паралельно ґратці розташований екран, на якому відстань між центральним і третім ($k=3$) максимумом дорівнює $l=0.15$ м. Визначити сталу ґратки.
190. Яку кількість енергії випромінює 1 см^2 тверднучого свинцю за 1 с? Відношення енергетичних світимостей поверхні свинцю і абсолютно чорного тіла для цієї температури вважати рівним 0,6.
191. Розжарена металева поверхня площею 10 см^2 випромінює в 1 хв $4 \cdot 10^4$ Дж. Температура поверхні рівна 2500 К. Знайти: 1) яким було б випромінювання цієї поверхні, якби вона була абсолютно чорною; 2) яке відношення енергетичних світимостей цієї поверхні і абсолютно чорного тіла при даній температури?
192. Температура абсолютно чорного тіла змінилася при нагріванні від 1000 до 3000 К. 1. У скільки разів збільшилася при цьому його енергетична світимість? 2. На скільки змінилася при цьому довжина хвилі, на яку припадає максимум спектральної густини енергетичної світимості? 3. У скільки разів збільшилася його максимальна спектральна густина енергетичної світимості?

193. Абсолютно чорне тіло знаходиться при температурі $T_1=2900$ К. Внаслідок охолодження тіла довжина хвилі, на яку припадає максимум спектральної густини і енергетичної світимості, змінилася на $\Delta\lambda=9$ мкм. До якої температури T_2 охолодилося тіло?
194. При якій частоті світла, що падає на поверхню тіла з металу з роботою виходу 2.2 еВ, максимальна швидкість фотоелектронів дорівнює 1000 км/с?
195. При бомбардуванні електронами атоми ртуті переходять у збуджений стан, якщо енергія електронів дорівнює 4.9 еВ або перевищує це значення. Розрахуйте довжину хвилі світла, що випромінює атом ртуті при переході з першого збудженого стану в нормальний.
196. Робота виходу електронів для натрію дорівнює $A_{вих}=2.27$ еВ. Знайти червону межу фотоэффекту для натрію.
197. Знайти червону межу фотоэффекту для металу з роботою виходу 2 еВ.
198. Яка енергія E виділилася б при повному перетворенні 1 г речовини в матерію у вигляді поля?
199. Найбільша довжина хвилі світла, при якій спостерігається фотоэффект для калію, рівна $6.2 \cdot 10^{-5}$ см. Знайти роботу виходу електрона з калію. Стала Планка $6.62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, швидкість світла $3 \cdot 10^8$ м/с.
200. Червона межа фотоэффекту для металу дорівнює $4.5 \cdot 10^{-7}$ м. Знайдіть роботу виходу.
201. Знайдіть максимальну швидкість фотоелектронів при освітленні поверхні тіла матеріалу з роботою виходу 1.9 еВ світлом довжиною хвилі $4 \cdot 10^{-7}$ м.
202. Фотоелектрони, що вириваються з поверхні металу світлом частотою $2.2 \cdot 10^{15}$ Гц, повністю затримуються зворотним потенціалом 6.6 В, а вирвані світлом з частотою $4.6 \cdot 10^{15}$ Гц – потенціалом 16.5 В. Визначити сталу Планка. Заряд електрона $1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл.
203. Рубіновий лазер випромінює в імпульсі $2 \cdot 10^{19}$ фотонів довжиною хвилі 694 нм. Яка середня потужність спалаху лазера, якщо його тривалість $2 \cdot 10^{-3}$ с? Стала Планка $6.62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, швидкість світла $3 \cdot 10^8$ м/с.
204. Знайти довжину хвилі де Бройля для електронів, що пройшли різницю потенціалів: 1) 1 В; 2) 100 В.
205. Знайти довжину хвилі де Бройля для: 1) електрона, що летить із швидкістю 10^8 см/с; 2) атома водню, що рухається з середньою квадратичною швидкістю при температурі 300 К; 3) кульки масою 1 г, що рухається зі швидкістю 1 см/с.
206. α -частинка, кінетична енергія якої дорівнює 500 еВ, влітає в однорідне магнітне поле перпендикулярно швидкості її руху. Індукція магнітного поля 0,1 Тл. Знайти: 1) силу, що діє на частинку; 2) радіус кола, по якому рухається частинка; 3) період обертання частинки.
207. При бомбардуванні ядер заліза ${}_{26}\text{Fe}^{56}$ нейтронами утворюється β -радіоактивний ізоотп марганцю атомною масою 56. Написати реакцію утворення радіоактивного марганцю і реакцію β -розпаду.
208. Знайдіть енергію зв'язку ядра атома дейтерію.
209. Внаслідок радіоактивного розпаду ${}_{92}\text{U}^{238}$ перетворюється в ${}_{82}\text{Pb}^{206}$. Скільки при цьому відбувається α - і β -розпадів?
210. Період піврозпаду ізоотпу радю ${}_{88}\text{Ra}^{226}$ – 1600 років. Скільки ядер ізоотпу розпадеться за 3200 років, якщо початкове число радіоактивних ядер 10^9 ?
211. Період напіврозпаду ядер ізоотпу йоду ${}_{53}\text{I}^{131}$ – 8 діб. Скільки радіоактивних ядер цього ізоотпу залишиться в зразку через 80 діб, якщо початкова кількість

радіоактивних ядер дорівнювала 10^9 ? Знайти масу йоду, що залишиться радіоактивним.

212. Діаметр бульбашки в рідко-водневій бульбашковій камері $\sim 10^{-7}$ м. Оцінити невизначеність при знаходженні швидкості електрона і α -частинки у такій камері, якщо невизначеність координати приблизно рівна діаметру бульбашки.
213. В потенціальному нескінченно-глибокому одновірному ящику енергія E електрона точно визначена. Вона дорівнює $E = \frac{p^2}{2m}$. Звідси $p^2 = 2mE$, тобто точно визначено. З другого боку, електрон „замкнено” в обмеженій області з лінійними розмірами l . Чи не суперечить це співвідношенню невизначеностей. (Відповідь: Ні, оскільки відомо p^2 , а не $p = \pm\sqrt{2mE}$, тобто точність, з якою визначений імпульс $\Delta p = \pm p$).
214. У реакторі атомної електростанції за $t=1.5$ год ділиться $m=1.5$ г ${}_{92}\text{U}^{235}$. Визначити електричну потужність станції, якщо її к.к.д. $\eta=10\%$, а при поділі одного ядра виділяється енергія $\Delta W=200$ МеВ.
215. Скільки фотонів падає за 1 с на 1 см^2 поверхні, якщо вона опромінюється потужністю $N=0.001$ Вт/см² γ -променями довжиною хвилі $\lambda=10^{-14}$ м.
216. Знайдіть енергетичний вихід ядерної реакції
- $${}^6_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^4_2\text{He}.$$
217. Визначити енергію антинейтрино, яке утворюється при розпаді нейтрона ${}_0n^1 \rightarrow {}_1H^1 + e + \bar{\nu}$, вважаючи, що утворені протон і електрон перебувають у спокої. Маси спокою нейтрона, протона та електрона відповідно дорівнюють $m_1=1.675 \cdot 10^{-27}$ кг, $m_2=1.672 \cdot 10^{-27}$ кг і $m_3=9.1 \cdot 10^{-31}$ кг.

16 ПРИКЛАДИ ТЕСТОВИХ ЗАВДАНЬ ДЛЯ СТУДЕНТІВ-ЗАОЧНИКІВ, ЩО ВЧАТЬСЯ ПО СКОРОЧЕНІЙ ПРОГРАМІ

16.1 Кінематика поступального руху

1. Автомобіль рухається на північ по прямій, чи може його прискорення бути направлене на південь? Поясніть.
2. Графік швидкості має вигляд:

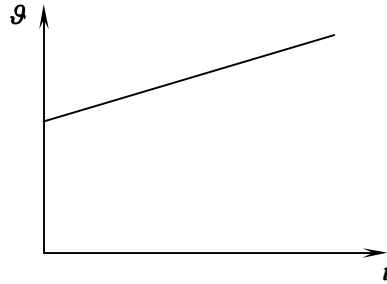


Рисунок 16.1

Який вигляд має графік прискорення $a(t)$ та шляху $x(t)$?

3. Автомобіль їхав на північ із швидкістю 60 км/год на протязі 35 хвилин, а потім зупинився на 20 хвилин і знову продовжував рухатись 1 годину із швидкістю 65 км/год. Чому дорівнює середня швидкість автомобіля?
4. Ракета піднімалася вертикально вгору із прискоренням 4 м/с^2 до висоти 1000 м. На цій висоті двигун відключився. На яку максимальну висоту підніметься ракета та через скільки часу вона впаде на Землю?
5. М'яч кинуто паралельно до Землі з висоти 20 м із швидкістю 8 м/с. Коли він вдариться об Землю та на якій відстані від місця кидання?
6. Висота гелікоптера над землею дається рівнянням $h=3t^3$. Через $t=2$ с з нього кинуто м'ячик. Через який час м'ячик впаде на Землю?
7. Положення частинки як функція часу дається графіком:

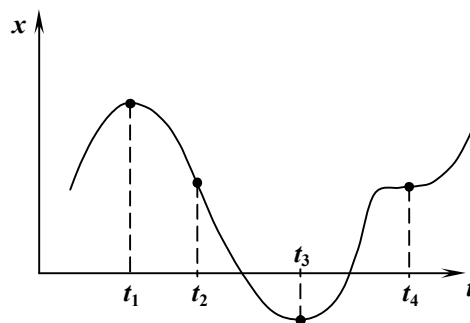


Рисунок 16.2

Визначити знак швидкості в моменти часу t_1, t_2, t_3, t_4 та знак прискорення в ті самі моменти часу.

8. Частинка рухається вздовж осі x за законом $x = 2t + 3t^2$. Знайти миттєву швидкість та прискорення в момент часу $t=3$ секунди.

16.2 Динаміка поступального руху

1. Чи є зв'язок між результируючою силою, що діє на тіло, і напрямком його руху?
2. Вантаж масою m спускається без тертя по похилій площині, що знаходиться під кутом 30° до горизонту. Знайти прискорення тіла, його швидкість та час спуску в точці дотику до землі. Довжина лінії спуску дорівнює 5 м.
3. Розв'язати попередню задачу, якщо сила тертя, що діє на вантаж, дорівнює 0,1 сили тяжіння.
4. Хокейна шайба має початкову швидкість 20 м/с. Визначити коефіцієнт тертя між льодом і шайбою, якщо вона зупинилась через 40 м.
5. Що є невірним у твердженні: „Поскілки автомобіль знаходиться у спокої, на нього не діють ніякі сили”? Як відкоректувати це речення?
6. Вантаж масою 2 кг спускається по похилій площині висотою $h=0,5$ м над поверхнею стола. Стіл має висоту $H=1,20$ м. Кінець похилої площини співпадає із краєм стола. Визначити прискорення, з яким спускається вантаж по похилій площині (тертя відсутнє), швидкість в момент відривання від стола та час з моменту початку руху до моменту падіння на підлогу.
7. Дві маси m_1 та m_2 розташовані на горизонтальній поверхні, що є абсолютно гладкою, зв'язані між собою невагомою ниткою. Визначити прискорення системи і натяг нитки, якщо до маси m_2 прикладена сила \vec{F} , напрямлена вправо (див. рис. 16.3).

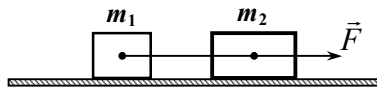


Рисунок 16.3

8. Горизонтальна сила $F = 8,6 + 2,5t^3$ діє на предмет масою 3,5 кг. Чому дорівнює горизонтальна швидкість предмету через 3 с після того, як він почав рухатись із стану спокою?

16.3 Обертний рух

1. М'яч прив'язано до нерозтяжної нитки довжиною 50 см, і підвішено до стелі. В момент, коли кут між ниткою та вертикаллю складає $\theta=20^\circ$, м'яч має швидкість 1,5 м/с. Знайти значення нормальної (радіальної) складової прискорення в цей момент та повне прискорення. (Тангенціальне прискорення, зумовлене тангенціальною складовою сили тяжіння mg дорівнює $a_\tau = g \sin \theta$.)
2. Електроточило (диск) розвиває швидкість 20 об/с за 4 секунди. Знайти кутове прискорення, з яким обертається диск та момент сил, що при цьому діє на нього. Маса диску 0,7 кг, діаметр – 16 см.
3. На диску (блоці), що має момент інерції I , підвішені на пружній нитці два вантажа масою m_1 (зліва) і масою m_2 (справа) від центра диску. Знайти лінійну швидкість вантажів після того, як вантаж масою m_2 пройшов шлях h . Система в початковому стані знаходилась в спокої.

4. Кут повороту колеса описується формулою $\theta = 5 + 10t + 2t^2$. Визначити величину кута, кутову швидкість та прискорення при $t=0$ і $t=3$ с.
5. Однорідний стержень довжиною l і масою M , закріплений за один кінець, може обертатись. Яку швидкість обертання він має, перейшовши із початкового горизонтального положення в вертикальне?
6. Знайти, чому дорівнює швидкість центру мас кулі, що скотилася з похилої площини висотою h . Маса кулі m .
7. Чому дорівнює момент інерції гантелі довжиною 40 см. Діаметр куль гантелі – 8 см, їх маса – 1,8 кг, а загальна маса гантелі – 3 кг.

16.4 Коливання і хвилі

1. Математичний маятник (в англійській мові називають „простий маятник”) має масу 0,2 кг і довжину 0,98 м. Він відхилений на 25° і відпущений. Чому дорівнює максимальна швидкість? Максимальне кутове прискорення? Максимальна відновлююча сила?
2. Як зміниться період коливань математичного маятника, якщо його перевезти з точки, де $g=9,81$ м/с² в точку, де $g=9,78$ м/с². Довжина маятника $l=0,981$ м.
3. Знайти момент інерції фізичного маятника, якщо його період коливань 5 с, маса 4,2 кг, а відстань від точки підвісу до центра мас – 0,6 м?
4. Горизонтальна платформа здійснює гармонічні коливання із періодом 3,0 с в горизонтальному напрямку. Тіло, що лежить на платформі, починає ковзати, коли амплітуда вібрацій досягає 0,3 м. Знайти коефіцієнт тертя між тілом і платформою.
5. Маса m коливається на вертикальній пружині. Коли $m=0,98$ кг, частота коливань дорівнює 0,1 с. Знайти невідому масу, якщо її період коливань дорівнює 1,2 с.
6. Прийняти в умовах попередньої задачі, що друге тіло має форму куба із стороною 5 см. Визначити його питому густину та можливий матеріал, із якого воно виготовлено.
7. Масивне тіло А здійснює гармонічні коливання, ковзаючи без тертя по деякій поверхні. Тіло В знаходиться на ньому і коефіцієнт тертя між ними дорівнює μ . Знайти максимальну амплітуду коливань, що може мати система, при якій тіло В не буде ковзати.
8. Маятник довжиною 0,98 м відхилено на кут 20° . Через 10 хвилин його відхилення дорівнювало $6,6^\circ$. Чому дорівнює коефіцієнт згасання та логарифмічний декремент згасання?

16.5 Термодинаміка

1. Кімната об'ємом 80 м³ наповнена повітрям ($\mu_{\text{нов}}=29$ кг/кмоль). Якщо температуру в кімнаті збільшити з 17°C до 27°C , то яка маса повітря вийде із кімнати при умові, що тиск лишається сталим (736 мм рт.ст.).
2. Що станеться, якщо скло термометра розшириться при нагріванні більше, ніж рідина, що знаходиться всередині? Дати пояснення.
3. Один грам води займає при атмосферному тиску 1 см³. Коли цю кількість води закип'ятити, то отримаємо 1671 см³ пари. Знайти зміни внутрішньої енергії для цього процесу (теплота пароутворення води $2,26 \cdot 10^6$ Дж/кг). Визначити, яку частину підведеної теплоти витрачено на роботу, а яку – на зміну внутрішньої енергії?

4. Один кг міді нагріли при атмосферному тиску від 27°C до 80°C . Знайти, який процент від затраченої теплової енергії при нагріванні перетворено в роботу ($C_{Cu}=387 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$; $\beta=3\alpha$; $\alpha=5,1\cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$).

5. Один моль ідеального газу повільно нагрівають так, що він перейшов із стану (p_0V_0) в стан $(3p_0; 3V_0)$. При цьому перехід із одного стану в другий здійснювався таким чином, що тиск був прямопропорційним об'єму. Яка робота при цьому була виконана?

6. Газ розширюється із стану А до стану В. Один із трьох можливих шляхів протікання процесів АІВ; АВ; АFB (рис. 16.4).

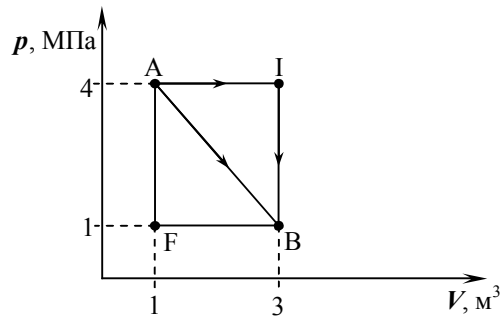


Рисунок 16.4

Знайти роботу, виконану газом по кожному із цих шляхів.

7. 10 молів ідеального газу ізотермічно розширили об'єм при 293 K в чотири рази в порівнянні із початковим значенням. Знайти роботу, виконану газом та підведenu до системи кількість теплоти.

8. Запропоновано двигун, що використовує градієнт температур в океані. Система працюватиме на перепаді температур на поверхні океану (20°C) та на глибині 1 км (5°C). Який максимальний к.к.д. можна при цьому отримати? Якщо вихідна потужність двигуна 75 МВт , якою має бути кількість теплової енергії, яку необхідно споживати для роботи на протязі години?

16.6 Обов'язкові питання з лабораторного практикуму

1. Які із перелічених одиниць є основними?
Ньютон, Паскаль, метр, Джоуль, секунда, Ват?
2. Момент інерції – це міра ваги чи міра інертності?
3. Чи може бути прискорення вантажу при вимірюванні моменту інерції, яке виконується в лабораторному практикумі, рівним $9,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$?
4. Збільшиться чи зменшиться момент інерції маятника Обербека, якщо замість залізної використати алюмінієву хрестовину?
5. В яких одиницях вимірюється коефіцієнт поверхневого натягу?
Дж, Па, Н/м, $\text{кг}\cdot\text{м}$?
6. Причина залежності коефіцієнта поверхневого натягу від температури – молекулярні зв'язки? (так чи ні)?
7. Як знайти діаметр невеликої кульки за допомогою мензурки?
8. Як знайти швидкість витікання води м/с із крану, маючи циліндричну посудину (банку), секундомір і штангенциркуль?
9. Як змінюється із ростом температури період коливань залізного маятника:
а) збільшується;

- б) не змінюється;
- в) зменшується?

10. Кутова швидкість, з якою обертається хрестовина маятника Обербека, є:

- а) постійною;
- б) лінійно спадаючою;
- в) лінійно зростаючою.

11. Вантаж в роботі із визначення моменту інерції маятника Обербека опускається донизу:

- а) рівномірно;
- б) рівноприскорено;
- в) рівносповільнено.

12. Лінійні швидкості руху вантажів (на хрестовині) і центру мас хрестовини відносно центру шківів маятника Обербека є:

- а) однаковими;
- б) лінійна швидкість руху вантажів є меншою;
- в) лінійна швидкість руху вантажів є більшою.

16.7 Електромагнітна індукція, змінний струм, електромагнітні коливання та хвилі

1. За 2 секунди магнітний потік, що пронизує контур, рівномірно збільшився з 2 Вб до 10 Вб. Чому дорівнює е.р.с., що виникла в контурі?

2. Енергія магнітного поля котушки індуктивністю 6 Гн дорівнює 12 Дж. Як зміниться енергія магнітного поля, якщо струм в котушці спаде в 3 рази?

3. За 2 секунди сила струму в котушці рівномірно зменшилась від 4 А до 2 А. Її індуктивність 3 Гн. Чому дорівнює е.р.с. самоіндукції?

4. Одиницею магнітного потоку є Ампер/сек, Генрі, Вебер/м чи Тесла?

5. Кільце із мідного дроту має переріз 0,01 см². Яку різницю потенціалів приклали до кінців дроту, що утворює кільце, якщо в центрі кола напруженість магнітного поля дорівнює 200 А/м.

6. В однорідному магнітному полі, що має індукцію 0,2 Тл, обертається котушка, яка складається із 100 витків. Вісь обертання є перпендикулярною її осі і напрямку магнітного поля. Період обертання котушки 0,2 с, переріз котушки 4 см². Знайти максимальне значення е.р.с., що при цьому виникає.

7. Потік магнітної індукції в провідному контурі змінюється за законом $\Phi = 2 + 3t$. Знайти силу індукційного струму в контурі, якщо його опір 2 Ом.

- а) 1;
- б) 2,5;
- в) 2;
- г) 1,5.

8. При якій умові реактивний опір кола змінного струму дорівнює нулю?

- а) відсутність ємності котушки або конденсатора;
- б) відсутність індуктивності;
- в) рівність ємнісного та індуктивного опорів;
- г) рівність реактивного та активного опорів.

9. Ємність конденсатора релаксаційного генератора збільшили в 2 рази. Що буде із частотою коливань?

- а) не зміниться;
- б) зменшиться в 4 рази;

- в) збільшиться в 4 рази;
- г) збільшиться в 2 рази;
- д) зменшиться в 2 рази.

10. Як змінили активний опір кола в лабораторній роботі по визначенні індуктивності котушки, якщо зсув по фазі між напругою та струмом змінився з 45 градусів на 60?

- а) збільшили в 1,7 рази;
- б) зменшили в 3 рази;
- в) збільшили в 3 рази;
- г) зменшили в 1,7 рази.

11. Як зміниться частота власних коливань контура, якщо до конденсатора підключити паралельно конденсатор, ємність якого ϵ в 15 разів більшою?

- а) збільшиться в 16 разів;
- б) зменшиться в 16 разів;
- в) збільшиться в 4 рази;
- г) зменшиться в 4 рази;
- д) не зміниться.

12. Максимальна напруга в коливальному контурі, що складається з індуктивності $L=5\text{мкГн}$ і ємності $C=13330\text{ пФ}$, дорівнює 1,2 В. Знайти діюче значення струму в контурі.

- а) 63 мА;
- б) 44 мА;
- в) 126 мА;
- г) 240 мА.

16.8 Інтерференція. Дифракція. Фотоефект

1. Лазерні джерела світла знаходяться в середовищі із показником заломлення $n=2$ і випромінюють світло із частотою $4 \cdot 10^{14}$ Гц. Який порядок максимуму в точці М, якщо геометрична різниця ходу променів до цієї точки рівна 1,5 мкм?

- а) $n=6$;
- б) $n=3$;
- в) $n=4$;
- г) $n=2$.

2. Дифракційна ґратка має 200 штрихів на 1 мм. Чому дорівнює кут дифракції, при якому спостерігається максимум першого порядку? $\lambda = 630\text{ нм}$.

- а) 30 градусів;
- б) $\arcsin 0,05$;
- в) $\arcsin 0,1$;
- г) $\arcsin 0,25$.

3. Яка умова спостереження максимуму найбільшого порядку:

- а) $k = \lambda / d$;
- б) $k = d / \lambda$;
- в) $k = d * \lambda$;
- г) $k = \lambda * 2d$.

4. Відносна похибка у визначенні довжини хвилі за допомогою дифракційної ґратки не включає:

- а) похибку сталої дифракційної ґратки;

- б) похибку відстані від джерела до екрану;
- в) похибку відстані між симетрично розміщеними максимумами.

5. При якій умові спостереження дифракції є найбільш ефективним:

- а) чим більше відрізняються розміри перешкод та довжини хвилі;
- б) чим менше відрізняються розміри перешкод та довжини хвилі;
- в) при довжинах хвиль, більших 1 мкм.

6. Маса спокою фотона дорівнює:

- а) масі спокою електрона;
- б) масі нейтрона;
- в) масі протона;
- г) нулю.

7. Якому виду випромінювання відповідає електромагнітна хвиля із енергією кванта 2 еВ?

- а) видимому світлу;
- б) ультрафіолетовому;
- в) рентгенівському;
- г) гамма-випромінюванню.

8. На що вказує наявність фотоструму при від'ємному потенціалі на аноді при зовнішньому фотоэффекті (див. лабораторний практикум)?

- а) на достатньо велику частоту світла, що викликав фотоэффект;
- б) на достатньо велику інтенсивність світла;
- в) на недостатню прикладену зворотню напругу;
- г) на недостатньо велику інтенсивність світла.

9. Джерело випускає Х-промені довжиною хвилі $1 \cdot 10^{-10}$ м. Чому дорівнює імпульс фотона?

- а) $6,6 \cdot 10^{-24}$ кг·м/с;
- б) $6,6 \cdot 10^{24}$ кг·м/с;
- в) 0;
- г) $1,5 \cdot 10^{-24}$ кг·м/с.

10. Вольтамперна характеристика фотоелемента – це:

- а) залежність фотоструму від освітленості при сталій напрузі;
- б) залежність фотоструму від напруги при постійній освітленості;
- в) залежність струму насичення від напруги;
- г) залежність фотоструму від затримуючої напруги;
- д) залежність напруги від освітленості при сталому струмі.

11. Визначити швидкість фотоелектронів, що вилітають із катода, якщо робота виходу дорівнює 3,8 еВ, а частота падаючого світла $4 \cdot 10^{14}$ Гц?

16.9 Атомний спектр. Напівпровідники. Атомне ядро

1. Яке із нижченаведених тверджень є вірним:

- а) атоми можуть випромінювати будь-яку порцію енергії, а поглинати тільки певний дискретний набір енергій;
- б) атоми можуть поглинати будь-яку порцію енергії, а випромінювати тільки певний дискретний набір енергій;
- в) атоми можуть випромінювати і поглинати енергію будь-якими порціями;
- г) атоми можуть випромінювати і поглинати енергію лише певними дискретними порціями.

2. Газоподібний гелій опромінюється потоком електронів. Чи може він при цьому випромінювати тільки одну спектральну лінію?

- а) ні, він буде випускати завжди весь свій лінійчатий спектр;
- б) ні, у цих умовах він буде випромінювати суцільний спектр;
- в) може, якщо енергія електронів у пучку більше енергії першого збудженого стану атомів, але менше енергії другого збудженого стану;
- г) може, якщо енергія електронів у пучку менше енергії першого збудженого стану атомів.

3. Донори – це:

- а) атоми домішок, що віддають електрони в валентну зону;
- б) атоми домішок, що забирають електрони із валентної зони;
- в) атоми домішок, що віддають електрони в зону провідності;
- г) атоми домішок, що забирають електрони із зони провідності.

4. При якій умові графік провідності напівпровідника і його концентрація як функція температури при обраному масштабі співпадають?

- а) при сталому електроопорі;
- б) при сталій рухливості носіїв;
- в) при лінійній температурній залежності рухливості;
- г) при обернено пропорційній температурній залежності рухливості.

5. В області власної провідності при 300 К опір напівпровідникового резистора становить 2700 Ом, а при 400К – 270 Ом. Якою повинна бути довжина електромагнітного випромінювання, щоб забезпечити відповідні переходи електронів із валентної зони в зону провідності?

6. На рисунку 2 представлена діаграма енергетичних рівнів атома. Перехід між якими із цих рівнів відбувається з випромінюванням фотона з максимальною частотою?

- а) 1→2. б) 2→1. в) 1→3. г) 3→1. д) 3→2. е) 2→3.

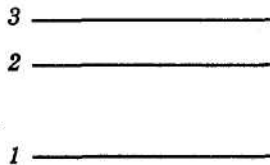


Рисунок 16.5

7. На рисунку 2 представлена діаграма енергетичних рівнів атома. Перехід між якими із цих рівнів відбувається з поглинанням фотона з максимальною довжиною хвилі?

- а) 1→2. б) 2→1. в) 1→3. г) 3→1. д) 3→2. е) 2→3.

8. На рисунку 1 представлений графік залежності максимальної енергії E фотоелектронів від частоти ν фотонів, що падають на поверхню напівпровідника. Яка енергія фотона із частотою ν_1 і робота виходу електрона з поверхні?

- а) 1,5 еВ, 2 еВ. б) 1,5 еВ, 3,5 еВ. в) 2 еВ, 3,5 еВ. г) 2 еВ, 1,5 еВ. д) 3,5 еВ, 1,5 еВ. е) 3,5 еВ, 2 еВ.

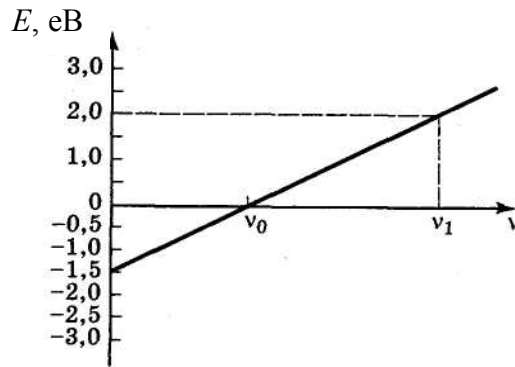


Рисунок 16.6

9. У середині атомного ядра відбулося спонтанне (мимовільне) перетворення нейтрона n у протон p : $n \rightarrow p + e^- + \nu$.

Що відбулося з ядром у результаті такого перетворення?

- α -розпад;
- електронний β -розпад;
- позитронний α -розпад;
- ядерна реакція розпаду;
- ядерна реакція синтезу.

10. Чи може після декількох мимовільних радіоактивних перетворень вийти ядро ізоотопу того ж хімічного елемента?

- може, після одного α - і одного β -розпаду;
- може, після одного β - і двох α -розпадів;
- може, після одного α - і двох β -розпадів;
- може, у результаті розпаду ядра;
- не може ні при яких розпадах.

11. Є 10^6 атомів радіоактивного ізоотопу з періодом напіврозпаду 10 хв. Скільки приблизно атомів з них лишається не перетвореними за 20хв?

- 10^6 ;
- $5 \cdot 10^5$;
- $7,5 \cdot 10^5$;
- $2,5 \cdot 10^5$;
- 0.

12. Скільки ядер урана-235 повинно повністю розпастись на нуклону, щоб потужність ядерного реактора була 1 Вт?

13. Які з наступних тверджень не є частиною моделі атома по Резерфорду?

- У нейтральному атомі є позитивно заряджене ядро дуже малих розмірів, у ядрі зосереджена більша частина маси атома.
- Електрони в атомі під дією кулонівських сил притягання рухаються навколо ядра, як планети рухаються навколо Сонця.
- Атом може змінювати свою енергію тільки дискретно, шляхом переходу з одного квантового стану в інший.

- тільки 1;
- тільки 2;
- тільки 3;
- 1 і 2;
- 1 і 3;
- 2 і 3;
- 1, 2 і 3.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Методичні поради, довідкові матеріали з математики.....	4
1.1 Методичні поради та рекомендації при вивченні фізики та підготовці до екзаменів та заліків.....	4
1.2 Предмет фізики, зв'язок з іншими науками, її роль в інженерній освіті.....	4
1.3 Одиниці та розмірності фізичних величин. Система СІ.....	5
1.4 Вектори та дії з ними. Графіки, похідні, інтеграли деяких функцій, що описують важливі фізичні процеси.....	6
2 Механіка поступального і обертового руху тіл.....	11
2.1 Швидкість і прискорення. Лінійна і кутова швидкість. Нормальне і тангенціальне прискорення. Кутове прискорення.....	11
2.2 Закони Ньютона.....	14
2.3 Сили в механіці.....	15
2.3.1 Вага тіла. Сили тяжіння, тертя.....	15
2.3.2 Сила пружності. Закон Гука. Пружні модулі.....	16
2.4 Робота і потужність.....	18
2.4.1 Робота.....	18
2.4.2 Потужність.....	19
2.5 Енергія. Зв'язок роботи зі зміною кінетичної і потенціальної енергії.....	19
2.6 Основний закон динаміки для обертового руху.....	20
2.6.1 Момент інерції, момент сили.....	20
2.6.2 Теорема Штейнера.....	21
2.6.3 Основний закон динаміки для обертового руху.....	22
2.7 Закони збереження в механіці.....	22
2.7.1 Закон збереження енергії.....	22
2.7.2 Закон збереження імпульсу.....	23
2.7.3 Закон збереження моменту імпульсу.....	23
2.8 Застосування закону збереження механічної енергії (на прикладі поведінки тіл, що знаходяться в полі сил тяжіння).....	24
Контрольні запитання до розділу „Механіка поступального й обертового руху”.....	25
3 Коливання і хвилі. Рівняння коливання.....	25
3.1 Амплітуда, фаза, період, частота гармонічних коливань.....	25
3.2 Математичний та фізичний маятники як приклади коливальних систем...	27
3.3 Затухаючі (згасаючі) та вимушені коливання.....	28
3.3.1 Затухаючі коливання, коефіцієнт затухання (згасання). Логарифмічний декремент затухання (згасання).....	28
3.3.2 Вимушені коливання. Явище резонансу та його умови. Резонанс у техніці.....	29
3.3.3 Біжучі і стоячі хвилі. Вузли та пучності.....	30
Контрольні запитання до розділу „Коливання і хвилі”.....	31
4 Тепло та теплові процеси.....	32
4.1 Молекулярно-кінетичний та термодинамічний підходи. Рівняння стану ідеального газу. Газові закони. Ізопроеци. Моль, число Авогадро.....	32
4.2 Теплоємність речовини.....	34
4.3 Закони (начала) термодинаміки.....	35
4.3.1 Перший закон термодинаміки.....	35

4.3.2	Другий закон термодинаміки.....	35
4.4	Теплові машини. ККД теплової машини. Цикл Карно.....	35
4.5	Фази. Фазові переходи. Плавлення (кристалізація), випаровування (конденсація). Кипіння. Теплота фазового переходу.....	37
	Контрольні запитання до розділу „Молекулярна фізика та термодинаміка”.....	41
5	Електростатика.....	41
5.1	Закон Кулона.....	41
5.2	Напруженість електричного поля. Потенціал, різниця потенціалів.....	42
5.3	Електроємність. Конденсатори. Енергія зарядженого конденсатора.....	44
	Контрольні запитання до розділу „Електростатика”.....	46
6	Постійний електричний струм.....	47
6.1	Електричний струм. Сила струму, густина струму. Різниця потенціалів, ЕРС, напруга.....	47
6.2	Закон Ома (для ділянки кола, повного кола та в диференціальній формі).....	48
6.3	Закон Джоуля-Ленца.....	49
	Контрольні запитання до розділу „Постійний струм”.....	51
7	Електромагнетизм.....	51
7.1	Взаємодія струмів. Закон Ампера, сила Лоренца.....	51
7.2	Явище електромагнітної індукції. ЕРС електромагнітної індукції. Правило Ленца.....	54
7.3	Самоіндукція. Е.р.с. самоіндукції. Індуктивність.....	56
7.4	Взаємоіндукція. Трансформатор.....	56
	Контрольні запитання до розділу „Електромагнетизм”.....	57
8	Електричні коливання. Змінний струм. Електромагнітні хвилі.....	58
8.1	Колівний контур. Формула Томсона.....	58
8.2	Отримання змінного струму. Сила струму і напруга: миттєві, амплітудні та ефективні значення. Потужність у колі змінного струму.....	59
8.3	Активний та реактивний опори. Закон Ома для змінного струму.....	61
8.4	Електромагнітні хвилі. Їх характеристики і властивості. Шкала електромагнітних хвиль.....	63
8.4.1	Рівняння Максвелла в інтегральній формі.....	63
8.4.2	Властивості та характеристики електромагнітних хвиль. Шкала електромагнітних хвиль.....	64
	Контрольні запитання до розділу „Електричні коливання. Змінний струм. Електромагнітні хвилі”.....	65
9	Елементи геометричної та хвильової оптики.....	66
9.1	Предмет оптики. Дуалізм світла. Закони геометричної оптики.....	66
9.2	Інтерференція, дифракція та поляризація. Їх застосування.....	67
9.2.1	Інтерференція.....	67
9.2.2	Дифракція.....	68
9.2.3	Поляризація.....	69
10	Квантова оптика.....	70
10.1	Закони теплового випромінювання. Пірометрія.....	70
10.1.1	Рівноважність теплового випромінювання.....	70
10.1.2	Характеристики теплового випромінювання.....	71
10.1.3	Закони теплового випромінювання. Оптична пірометрія.....	71
10.1.4	Закон Стефана-Больцмана.....	72
10.1.5	Закон зміщення Віна.....	72
10.1.6	Оптична пірометрія та її застосування.....	72

10.2	Фотоелектричні явища.....	73
10.2.1	Гіпотеза Планка. Кванти світла. Формула Планка для розподілу енергії по частотах (довжинах хвиль).....	73
10.2.2	Фотони.....	73
10.2.3	Фотоэффект, закони та застосування.....	74
	Контрольні запитання до розділу „Квантова оптика”.....	75
11	Випромінювання та поглинання світла атомами. Лазери та їх застосування.....	76
11.1	Формула Бальмера. Постулати Бора.....	76
11.2	Лазери.....	77
11.3	Фізико-технічні принципи побудови оптичних квантових генераторів. Блок-схема ОКГ. Застосування ОКГ.....	78
12	Хвильові властивості частинок. Електронний мікроскоп.....	79
13	Провідність металів, діелектриків, напівпровідників. Надпровідникові прилади.....	81
13.1	Зони в твердих тілах.....	81
13.2	Власна і домішкова провідність напівпровідників. Дірки та електрони. Донори та акцептори.....	82
13.3	Температурна залежність провідності напівпровідників.....	83
13.4	P-n-перехід. Напівпровідникові діоди та транзистори.....	84
	Контрольні запитання до розділу „Провідність металів, діелектриків, напівпровідникові прилади”.....	87
14	Фізика ядра та елементарних частинок.....	87
14.1	Будова ядра. Ізотопи.....	87
14.2	Енергія зв'язку атомного ядра. Дефект маси.....	88
14.3	Радіоактивність. Властивості, реєстрація випромінювання.....	89
14.3.1	Методи реєстрації частинок.....	90
14.3.1.1.	Сцинтиляційні лічильники. Іонізаційний лічильник Гейгера-Мюллера. Напівпровідникові детектори.....	90
14.3.1.2.	Реєстрація нейтронів. Камера Вільсона.....	91
14.3.1.3.	Фотоемульсійні методи.....	91
14.3.1.4.	Детектори на ефекті Вавілова-Черенкова.....	91
14.4	Біологічна дія радіації.....	91
14.5	Ланцюгова ядерна реакція. Фізичні принципи отримання атомної енергії. Фізичні аспекти охорони навколишнього середовища.....	92
14.6	Перспективи „глобальної” енергетики: аналіз з позиції фізики.....	97
	Програмні питання.....	99
15	Задачі для самопідготовки, самостійних та контрольних робіт.....	101
15.1	Методичні вказівки до розв'язування задач.....	101
15.2	Задачі з розв'язками.....	102
15.3	Задачі для самостійного розв'язування.....	119
16	Приклади тестових завдань з механіки та термодинаміки для студентів–заочників, що вчать по скороченій програмі.....	134
16.1	Кінематика поступального руху.....	134
16.2	Динаміка поступального руху.....	135
16.3	Обертний рух.....	135
16.4	Коливання і хвилі.....	136
16.5	Термодинаміка.....	136
16.6	Обов'язкові питання з лабораторного практикуму.....	137
16.7	Електромагнітна індукція, змінний струм, електромагнітні коливання та хвилі.....	138

16.8 Інтерференція. Дифракція. Фотоефект.....	139
16.9 Атомний спектр. Напівпровідники. Атомне ядро.....	140