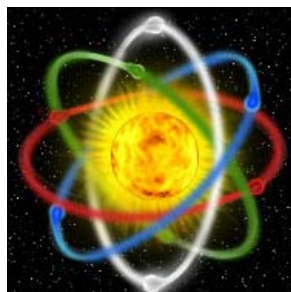
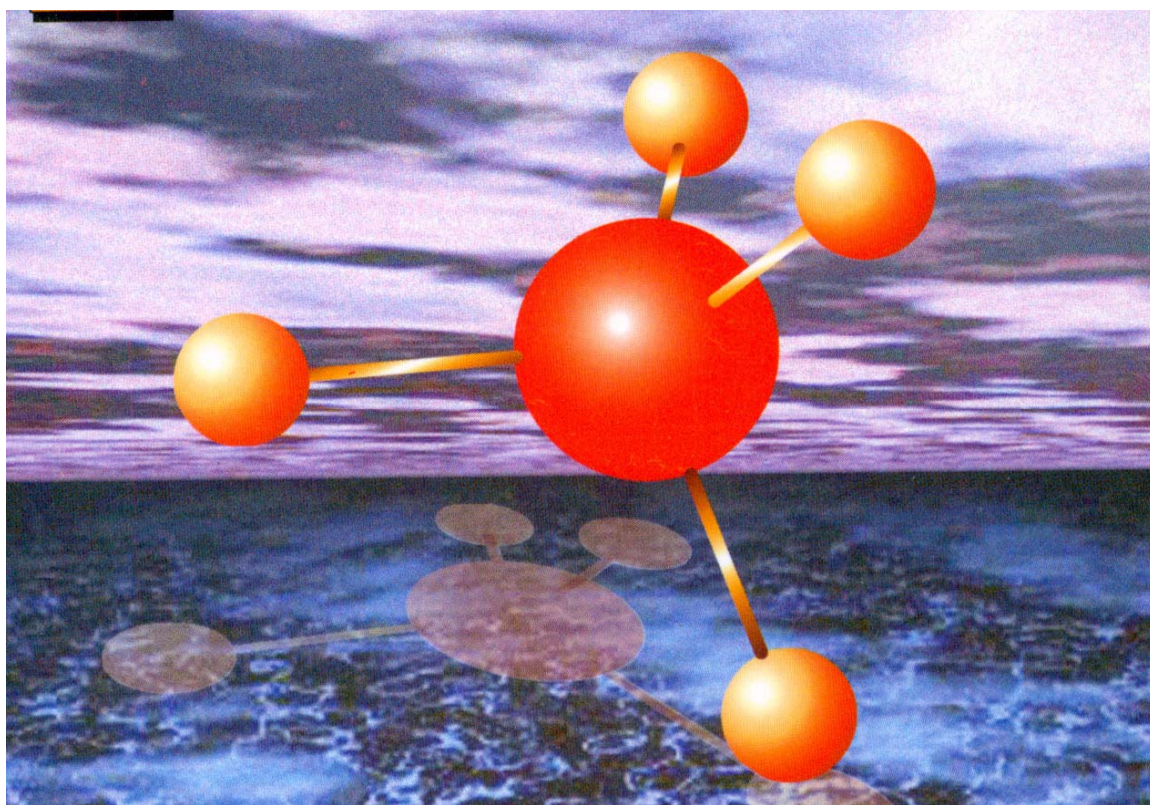


М. В. Лисий, І. М. Поспелов



**КУРС ЗАГАЛЬНОЇ ФІЗИКИ
ДЛЯ СЛУХАЧІВ-ІНОЗЕМЦІВ
ПІДГОТОВЧОГО ВІДДІЛЕННЯ**



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

М. В. Лисий, І. М. Поспєлов

**Курс загальної фізики
для слухачів-іноземців
підготовчого відділення**

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2010

УДК 53 (075)
ББК 22. 3 я 73
Л63

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 5 від 24 грудня 2009 р.)

Рецензенти:

Р. С. Гуревич, доктор педагогічних наук, професор

І. О. Сивак, доктор технічних наук, професор

В. Г. Дзись, кандидат технічних наук, доцент

Лисий, М. В.

Л63 Фізика для слухачів-іноземців підготовчого відділення: навчальний посібник / М. В. Лисий, І. М. Поспелов. - Вінниця: ВНТУ, 2010. – 209 с.

Навчальний посібник для слухачів-іноземців підготовчого відділення складено згідно з повною навчальною програмою з фізики для вступників до технічного вузу. У кожному розділі посібника подані теоретичні відомості, основні поняття, закони і формули з тем, що вивчаються, далі даються приклади розв'язування задач з глибоким їх аналізом, потім слухачам з метою закріплення вивченого матеріалу і для самоконтролю пропонуються задачі для самостійного розв'язування.

В кінці посібника розміщений довідник постійних величин і англо-український словник фізичних термінів.

УДК 53 (075)

ББК 22. 3 я 73

© М. Лисий., І. Поспелов, 2010

Зміст

	Передмова	5
1	Механіка	6
1.1	Кінематика	6
1.1.1	Прямолінійний рівномірний рух	7
1.1.2	Змінний прямолінійний рух	13
1.1.3	Вільне падіння	18
1.1.4	Обертальний рух тіла навколо нерухомої осі	22
1.1.5	Рух тіла, кинутого під кутом до горизонту. Рух тіла, кинутого горизонтально	27
1.2	Динаміка	32
1.2.1	Основи динаміки. Закони Ньютона	32
1.2.2	Сили в природі	36
1.2.3	Імпульс тіла. Закон збереження імпульсу	43
1.2.4	Робота, потужність, енергія. Закон збереження енергії	46
1.3	Елементи статички	51
2	Молекулярна фізика і основи термодинаміки	57
2.1	Молекулярна фізика	57
2.1.1	Основи молекулярно-кінетичної теорії (МКТ)	57
2.1.2	Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії. Середня квадратична швидкість молекул	61
2.1.3	Ідеальний газ. Рівняння стану. Ізопроееси. Закон Дальтона ...	64
2.1.4	Зміна агрегатного стану речовини	69
2.1.5	Поверхневий натяг і деякі властивості рідин	73
2.2	Основи термодинаміки	76
2.2.1	Робота в термодинаміці. Внутрішня енергія	76
2.2.2	Тепловий двигун. Ідеальна теплова машина. Цикл Карно	81
3	Електрика і магнетизм	84
3.1	Електрика	84
3.1.1	Електричне поле. Закон Кулона. Напруженість поля	84
3.1.2	Робота, потенціал. Різниця потенціалів	89
3.1.3	Електроємність. Конденсатори	90
3.1.4	Електричний струм. Закони постійного струму	94
3.1.5	Робота і потужність електричного струму. Закон Джоуля-Ленца	101
3.1.6	Електричний струм у різних середовищах	104
3.2	Магнетизм	113
3.2.1	Магнетне поле. Сила Ампера. Сила Лоренца	113
3.2.2	Магнетний потік. Електромагнетна індукція	118
4	Коливання та хвилі	124
4.1	Електромагнетні коливання	131
5	Елементи теорії відносності	134
6	Оптика	138
6.1	Геометрична оптика	138

6.1.1	Оптичні системи. Побудова зображень	143
6.2	Фотометрія	149
6.3	Фізична оптика	152
6.3.1	Поляризація світла	154
7	Квантово-оптичні явища	158
7.1	Фотоефект	158
7.2	Ефект Комптона	159
7.3	Тиск світла	160
8	Фізика атома і атомного ядра	163
8.1	Фізика атома	163
8.2	Будова атома	165
8.3	Радіоактивність. Закони радіоактивного розпаду	165
8.4	Властивості радіоактивного випромінювання	166
8.5	Дефект маси, енергія зв'язку. Ядерні реакції	167
9	Лабораторні роботи	174
10	Додатки	198
11	Словник технічних термінів	203
12	Література	208

Передмова

Посібник призначений для слухачів-іноземців підготовчого відділення. Його можна використовувати для узагальнення й систематизації знань у процесі вивчення шкільного курсу фізики та підготовки до незалежного тестування з предмета, а також для тих, хто самостійно готується до конкурсних іспитів у вузи.

Збірник написаний згідно з програмою та навчальним планом з фізики для підготовчих відділень на основі аналізу літературних джерел. Використано також особистий досвід роботи авторів із слухачами-іноземцями підготовчого відділення.

Матеріали посібника спрямовані на роз'яснення змісту фізичних законів, явищ і понять з усіх розділів фізики.

Поряд з теоретичним матеріалом подано приклади розв'язування задач, а також задачі для самостійної роботи слухачів.

Метою авторів посібника є конкретизація знань слухачів з фізики, формування умінь і навичок застосовувати знання з предмета в стандартних і нестандартних ситуаціях, навчання конкретним прийомам розв'язування фізичних задач, формування вміння вибирати і обґрунтовувати способи розв'язування задач і раціонально їх розв'язувати.

У збірнику вміщено задачі різної складності, до яких пропонуються відповіді. Така форма більш природна для активного і творчого вивчення фізики. Крім того, існує потреба озброїти слухачів уміннями і навичками самостійного пізнання навколишніх явищ, використання набутих знань та застосування їх на практиці. Оскільки самостійний пошук розв'язків задач є найактивнішим виявленням знань та розуміння фізичних явищ і законів, а вміння розв'язувати задачі формується через вправи та роздуми, всі розділи збірника містять завдання для самостійної роботи.

У посібнику також описані лабораторні роботи до розділів курсу загальної фізики, які мають на меті поглибити теоретичні знання слухачів, ознайомити їх з технічними засобами і методами вимірювання.

Для практичної роботи наприкінці посібника у додатках поміщені необхідні сталі величини та табличні значення.

У посібнику використана Міжнародна система СІ, що встановлена Державним стандартом України як така, котрій слід віддавати перевагу у всіх областях науки й техніки та при викладанні.

1 МЕХАНІКА

Розділ фізики, який вивчає закономірності механічного руху тіл та причини його виникнення і змін, називають *механікою*.

Класична механіка (механіка Ньютона) включає в себе такі розділи: кінематика, динаміка, статика.

1.1 Кінематика

Кінематика – розділ механіки, в якому вивчають геометричні властивості механічного руху тіл у просторі й часі без урахування їхньої маси та сил, що діють на ці тіла.

Найпростішим і найпоширенішим в природі є механічний рух.

Механічним рухом називають зміну положення тіла (або його частини) з часом відносно інших тіл. Основна задача механіки (пряма задача) така: за відомим описанням взаємодії тіл (у часі і просторі) встановити залежність їх координат від часу, тобто описати механічний рух тіла.

Обернена задача – знайти сили, що діють на тіло в кожний момент часу за початковими та кінцевими координатами і швидкостями його руху.

Закони класичної механіки будуть справедливими при умові, що:

- а) швидкість тіла набагато менша за швидкість світла у вакуумі;
- б) розміри тіла великі порівняно з розміром атома;
- в) у просторі відсутні силові поля, набагато сильніші за поле тяжіння Землі.

Механічний рух є відносним. Положення тіла в просторі можна визначити тільки відносно будь-якого іншого тіла або інших тіл. Тіло, відносно якого розглядається рух в просторі й часі інших тіл, називають *тілом відліку*. Сукупність системи координат, пов'язаної з тілом відліку, та системи засобів для вимірювання часу називають системою відліку.

Положення точки на прямій визначається однією координатою x . Положення точки у площині визначається двома координатами: x, y .

Положення точки в просторі визначається трьома координатами: x, y, z .

Простіше описати рух матеріальної точки, ніж тіла. Тіло, розмірами якого за даних умов руху можна знехтувати, називають *матеріальною точкою*. Слова «за даних умов» означають, що одне й те ж саме тіло в одному випадку можна розглядати як матеріальну точку, в іншому – як протяжне тіло. Матеріальна точка, рухаючись, описує деяку лінію в просторі. Ця лінія називається *траєкторією*. Залежно від форми траєкторії рух може бути прямолінійним або криволінійним. Форма траєкторії залежить від вибору системи відліку. Рівняння залежності координат від часу: $x = f_1(t), y = f_2(t), z = f_3(t)$ - називаються рівняннями руху.

Рух тіла, під час якого всі його точки рухаються однаково, називають *поступальним*. При поступальному русі будь-яка пряма, подумки проведена в тілі, залишається паралельною самій собі.

При поступальному русі тіло одночасно не обертається і навіть не повертається.

Зі змінами координат пов'язана перша з величин, яка вводиться для опису руху, – *переміщення*. Переміщенням тіла (матеріальної точки) називають векторну фізичну величину, яка характеризує зміну положення тіла у просторі і визначається як вектор, який з'єднує початкове положення тіла з кінцевим.

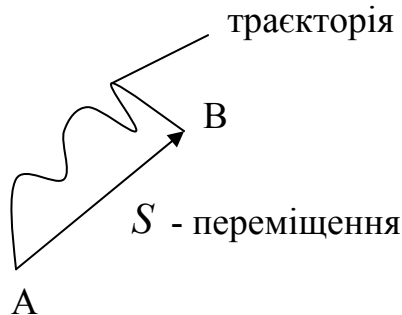


Рисунок 1

Переміщення – це направлений відрізок, що сполучає початкове (А) і наступне (В) положення тіла (рис.1). Довжину вектора переміщення можна обчислити за його проекціями або за координатами точок А і В:

$$S = \sqrt{S_x^2 + S_y^2 + S_z^2},$$

$$\text{де } S_x = X_B - X_A;$$

$$S_y = Y_B - Y_A;$$

$$S_z = Z_B - Z_A.$$

Довжина шляху точки визначається сумою довжин всіх ділянок траєкторії, пройденої точкою за відповідний проміжок часу: $\Delta l = t_2 - t_1$.

$$\Delta l = \Delta l(t).$$

Шлях є скалярною величиною. Модуль вектора переміщення менший або рівний за пройдений шлях: $|\vec{S}| \leq l$.

1.1.1 Прямолінійний рівномірний рух

Рух, напрям якого не змінюється, називають прямолінійним. При прямолінійному русі модуль вектора переміщення дорівнює пройденому шляху:

$$|\vec{S}| = l,$$

$$S = \sqrt{S_x^2 + S_y^2},$$

$$\text{де } S_x = X_B - X_A;$$

$$S_y = Y_B - Y_A.$$

Прямолінійним рівномірним рухом (ПРР) називається рух, при якому матеріальна точка (тіло) за будь-які послідовні однакові інтервали часу здійснює однакові переміщення. Для описання прямолінійного руху зручно спрямувати одну з координатних осей (Х або У) уздовж тієї прямої, по якій рухається тіло. Тоді під час такого руху буде тільки одна координата, яка змінюється. Векторна величина, яка характеризує

швидкість зміни положення тіла у просторі і визначається відношенням переміщення тіла до інтервалу часу, за який дане переміщення було здійснено, називається *швидкістю*:

$$\vec{g} = \frac{\vec{S}}{t}.$$

Одиницею швидкості в СІ є $|\vec{g}| = 1 \text{ м/с}$. Модуль швидкості руху тіла вимірюють спідометром. Для обчислення переміщення і швидкості користуються формулами, до яких входять не вектори, а їхні проекції на осі (або вісь) координат. Проекції векторів – величини скалярні, тому над ними можна виконувати алгебраїчні дії.

Оскільки вектори \vec{S} і $\vec{g}t$ рівні, то рівні також їхні проекції на вісь Ox . Тому можна записати у скалярній формі так:

$$S_x = g_x t.$$

Користуючись формулою $S_x = x - x_0$, можна обчислити координату x тіла в будь-який момент часу t :

$$x - x_0 = g_x t, \text{ або } x = x_0 + g_x t,$$

де x_0 - координата тіла в початковому положенні.

Графіки залежності від часу проекції переміщення, координати і швидкості мають вигляд (рис. 2).

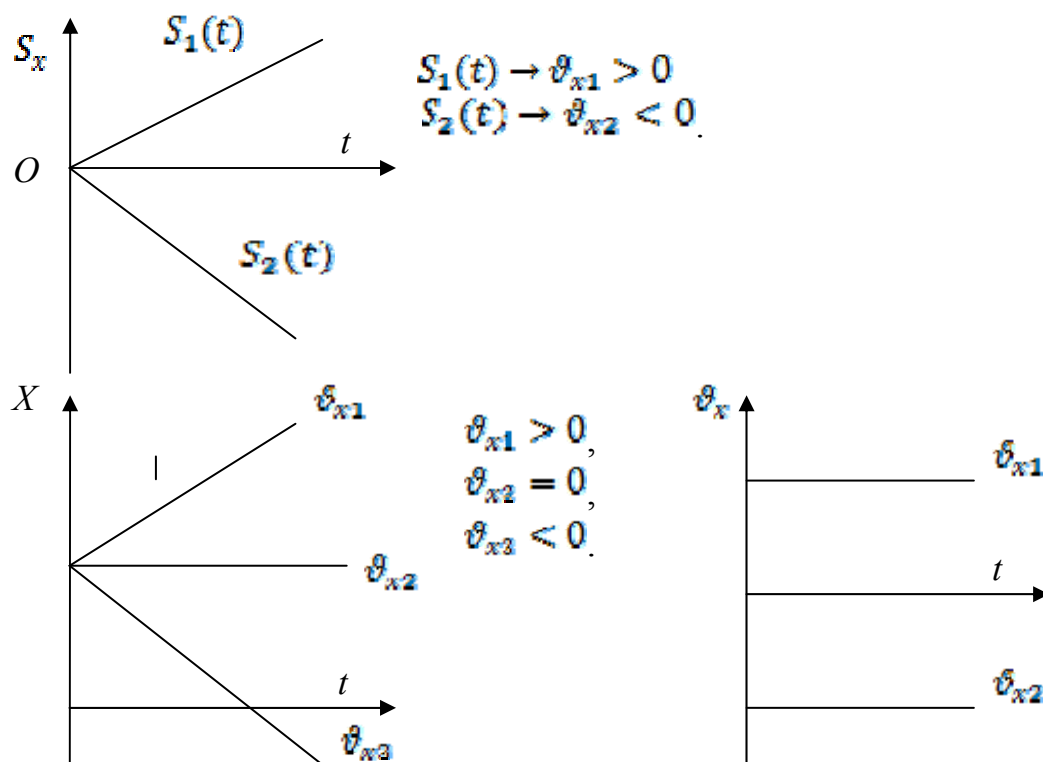


Рисунок 2

Якщо швидкість тіла стала, то шлях чисельно дорівнює площі прямокутника (рис. 3).

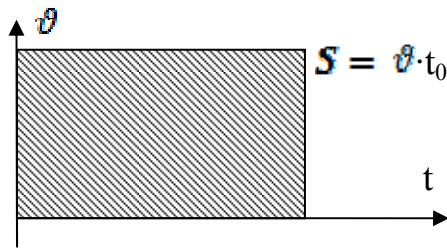


Рисунок 3

Приклади розв'язування задач

1. Із пункту А до пункту В, відстань між якими $l = 7,5$ км, одночасно назустріч один одному почали рухатися два велосипедисти: перший - зі швидкістю 18 км/год, другий – 9 км/год. Визначити час, через який вони зустрінуться, і відстань від пункту А до місця зустрічі.

Розв'язання

Дано

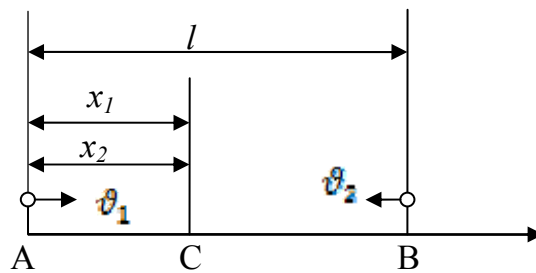
$$l = 7,5 \text{ км} = 7500 \text{ м}$$

$$g_1 = 18 \text{ км/год} = 5 \text{ м/с}$$

$$g_2 = 9 \text{ км/год} = 2,5 \text{ м/с}$$

x -?,

t -?



У момент зустрічі (точка С) координати велосипедистів будуть однакові. Запишемо рівняння руху велосипедистів, враховуючи, що у початковий момент ($t = 0$) перший велосипедист знаходився на початку координат, а другий – у точці В, координату якої позначимо l . Для велосипедиста, що рухається з пункту А: $x_1 = v_1 t$.

Для велосипедиста, що рухається з пункту В: $x_2 = l - v_2 t$.

В момент зустрічі $x_1 = x_2$, тобто $v_1 t = l - v_2 t \Rightarrow t = \frac{l}{v_1 + v_2}$.

Місце зустрічі (координата точки С):

$$x_1 = v_1 t, \quad x_1 = \frac{v_1 l}{v_1 + v_2}.$$

Підставивши числові значення, знайдемо значення величини:

$$t = \frac{7,5 \cdot 10^3}{5 + 2,5} = 1000 \text{ с}, \quad x = \frac{5 \cdot 7,5 \cdot 10^3}{7,5} = 5 \cdot 10^3 \text{ м} = 5 \text{ км}.$$

Відповідь: $t = 1000$ с, $x = 5$ км.

2. Моторний човен першу половину шляху рухався по озеру зі сталою швидкістю 36 км/год, а другу – зі швидкістю 18 км/год. Чому дорівнює середня швидкість моторного човна на всьому шляху?

Дано

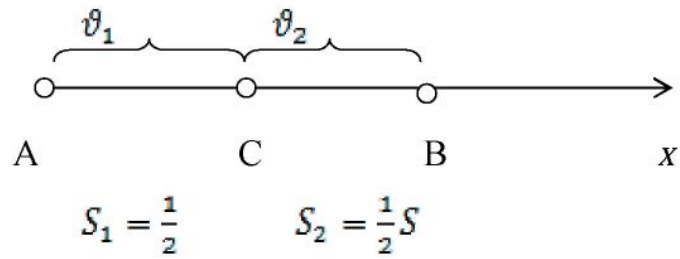
$$S_1 = S_2 = \frac{1}{2} = S$$

$$g_1 = 36 \text{ км/год} = 10 \text{ м/с}$$

$$g_2 = 18 \text{ км/год} = 5 \text{ м/с}$$

$g_{\text{н\ddot{a}д}}$ - ?

Розв'язання



Середню швидкість човна на всьому шляху визначимо за формулою:
 $g_{\text{н\ddot{а}д}} = \frac{S_1 + S_2}{t_1 + t_2}$, для першої половини - $t_1 = \frac{S_1}{g_1}$, для другої - $t_2 = \frac{S_2}{g_2}$.

Підставимо значення t_1 і t_2 у формулу для $g_{\text{н\ddot{а}д}}$ і, врахувавши $S_1 = S_2 = \frac{1}{2}S$, отримаємо:

$$g_{\text{н\ddot{а}д}} = \frac{\frac{1}{2}S + \frac{1}{2}S}{\frac{S}{2g_1} + \frac{S}{2g_2}} = \frac{2g_1g_2}{g_1 + g_2}.$$

Зробивши обчислення, отримаємо:

$$g_{\text{сеп}} = \frac{2 \cdot 10 \cdot 5}{10 + 5} = 6,6 \text{ м/с}.$$

Відповідь: $g_{\text{сеп}} = 6,6 \text{ м/с}$.

3. Людина біжить по ескалатору. Перший раз вона нарахувала $n_1=50$ східців, а другий раз, рухаючись у той самий бік зі швидкістю втриє меншою, вона нарахувала $n_2=75$ східців. Скільки східців нарахувала б людина на нерухомому ескалаторі?

Розв'язання

Дано

$$n_1 = 50 \text{ східців}$$

$$U_2 = 3 U_1$$

n - ?

В нашій задачі напрями швидкостей людини і ескалатора збігаються. Позначимо g - швидкість ескалатора, l - його довжина, n - число східців, U - швидкість людини, $\frac{n}{l}$ - кількість східців, які припадають на одиницю довжини ескалатора.

Коли людина йде зі швидкістю U відносно ескалатора, то час перебування її на ескалаторі $\frac{l}{g+U}$, а шлях, який вона проходить по ескалатору $\frac{U \cdot l}{g+U}$, при цьому людина налічить $n_1 = \frac{U \cdot l}{g+U} \cdot \frac{n}{l}$ східців.

За аналогією в другому випадку $n_2 = \frac{3 \cdot U \cdot l}{g+3U} \cdot \frac{n}{l}$. Отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} n_1 = \frac{U}{U+g} n \\ n_2 = \frac{3U}{g+3U} n \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 1 + \frac{g}{U} = \frac{n}{n_1} \\ 1 + \frac{1}{3} \frac{g}{U} = \frac{n}{n_2} \end{cases}$$

Виключивши відношення $\frac{g}{U}$, знаходимо:

$$n_2 = \frac{2 \cdot n_1 \cdot n_2}{3n_1 - n_2} = \frac{2 \cdot 50 \cdot 75}{3 \cdot 50 - 75} = 100.$$

Відповідь: $n = 100$ східців.

2. Моторний човен проходить відстань між двома пунктами А і В за течією річки протягом часу $t_1 = 3$ год, а пліт - протягом часу $t = 12$ год. Скільки часу t_2 витратить моторний човен на зворотний шлях?

Розв'язання

Дано $t_1 = 3$ год $t = 12$ год $t_2 = ?$	Позначимо через U швидкість течії, а через g швидкість човна відносно води, запишемо:
	$t_1 = \frac{S}{g+U},$ (1)
	$t = \frac{S}{U}.$ (2)

Щоб визначити час $t_2 = \frac{S}{g-U}$ зворотного руху човна, рівняння (1) і (2) запишемо так:

$$\frac{1}{t_1} = \frac{g}{S} + \frac{U}{S},$$
 (3)

$$\frac{1}{t} = \frac{U}{S}.$$
 (4)

Віднімемо від рівняння (3) подвоєне рівняння (4), дістанемо:

$$\frac{1}{t_1} - \frac{2}{t} = \frac{g}{S} - \frac{U}{S} = \frac{1}{t_2}.$$

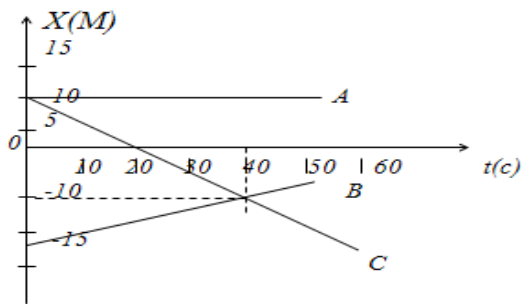
Звідки: $t_2 = \frac{tt_1}{t - 2t_1},$

підставимо числа, отримаємо:

$$t_2 = \frac{12 \cdot 3}{12 - 2 \cdot 3} = 6 \text{ год.}$$

Відповідь: $t_2 = 6$ год.

3. На рисунку зображено графіки руху тіл А, В, С. Записати рівняння $x = x(t)$. Знайти координати тіл через 5 с після початку руху цих тіл, місце і час зустрічі тіл В і С. Записати рівняння $g = g(t)$ для кожного тіла і побудувати відповідні графіки.



Розв'язання

Рух прямолінійний, тому залежність координати тіла від часу має вигляд: $x = x_0 + v t$. Для тіл А, В, С: $x_{0A} = 10$ і, $x_{0B} = -15$ і, $x_{0C} = 10$ і, для тіла А координата з часом не змінюється, отже швидкість тіла А рівна нулю $v_A = 0$. Швидкості тіл В і С

будемо шукати відношенням $\frac{\Delta x}{\Delta t}$.

$$v_B = \frac{-10 - (-15)}{40 - 0} = 0,125 \text{ м/с}, \quad v_C = \frac{0 - 10}{20 - 0} = -0,5 \text{ м/с}.$$

Отже, рівняння їх руху будуть такими:

для тіла А: $x_A = 10$;

для тіла В: $x_B = -15 + 0,125t$;

для тіла С: $x_C = 10 - 0,5t$.

Через час $t = 5$ с координати цих тіл будуть рівними: $x_A = 10$ м,

$$x_B = -15 + 0,125 \cdot 5 = -14,275 \text{ м},$$

$$x_C = 10 - 0,5 \cdot 5 = 7,5 \text{ м}.$$

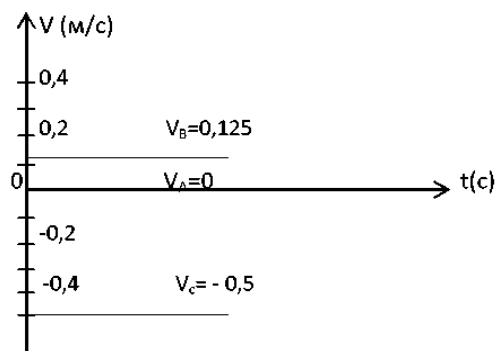
Місце зустрічі і час тіл В і С визначимо, прирівнявши координати

$$x_B = x_C,$$

$$-15 + 0,125t = 10 - 0,5t \Rightarrow t = \frac{25}{0,625} = 40 \text{ с}.$$

Відповідь: $x = 10 - 0,5 \cdot 40 = -10$ м.

Всі тіла рухаються з постійними швидкостями. Графіками будуть прямі лінії:



Задачі для самостійного розв'язування

1. Автомобіль проїхав першу половину шляху із швидкістю $v_1 = 10$ м/с, а другу половину шляху – із швидкістю $v_2 = 15$ м/с. Визначити середню швидкість на всьому шляху. Довести, що середня швидкість менша, ніж середнє арифметичне значення v_1 і v_2 .

Відповідь: $v_c = 12$ м/с.

2. Тіло рухалося протягом часу $t_1 = 5$ с зі швидкістю $v_1 = 5$ м/с, і $t_2 = 10$ с зі швидкістю $v_2 = 5$ м/с, і $t_3 = 6$ с зі швидкістю $v_3 = 20$ м/с. Визначити середню швидкість тіла на всьому шляху.

Відповідь: $v_c = 8,87$ м/с.

3. Два поїзди їдуть назустріч один одному із швидкостями 36 км/год і 54 км/год. Пасажир, який їде в першому поїзді, помічає, що другий поїзд проходить повз нього протягом 6 с. Яка довжина другого поїзда?

Відповідь: $l = 150$ м.

4. Ескалатор метро піднімає пасажирів, що нерухомо стоять на ньому, за 1 хв. Ідучи по нерухомому ескалатору, пасажир піднімається за 3 хв. За який час пасажир піднімається, ідучи по рухомому ескалатору?

Відповідь: $t = 45$ с.

5. З двох пунктів А і В, відстань між якими дорівнює 9 км, одночасно, в одному напрямі почали рухатися два мотоциклісти. Швидкість мотоцикліста, який почав рух з пункту А, - 54 км/год, мотоцикліста, що виїхав з пункту В, - 36 км/год. Через який час мотоцикліст, що виїхав з пункту А, наздожене мотоцикліста, що рухається з пункту В? Яке переміщення здійснить кожний мотоцикліст?

Відповідь: $t = 0,5$ год; $S_1 = 27$ км; $S_2 = 18$ км.

6. Між двома пунктами, розміщеними на річці на відстані $S = 100$ км один від одного, курсує катер, який, рухаючись за течією, проходить усю відстань за $t_1 = 4$ год, а проти течії - за $t_2 = 10$ год. Визначити швидкість течії річки U і швидкість катера v відносно води.

Відповідь: $U = 7,5$ км/год, $v = 17,5$ км/год.

7. Коли два тіла рівномірно рухаються назустріч одне одному, то відстань між ними зменшується на $S_1 = 16$ м за кожних $t_1 = 10$ с. Якщо тіла з такими ж швидкостями будуть рухатися в одному напрямку, то відстань між ними буде збільшуватися на $S_2 = 3$ м за кожних $t_2 = 5$ с. Які швидкості кожного із тіл?

Відповідь: $U_1 = 1,6$ м/с і $U_2 = 0,6$ м/с.

8. Швидкість потягу між двома пунктами $v_1 = 80$ км/год, середня швидкість на всьому шляху $v_2 = 60$ км/год, час зупинки займає час $t_2 = 1$ год. Знайти відстань між цими пунктами?

Відповідь: $L = 240$ км.

1.1.2 Змінний прямолінійний рух

На практиці частіше доводиться мати справу з такими рухами, під час яких швидкість руху з часом змінюється. Такі рухи називають нерівномірними або змінними і їх характеризують середньою швидкістю:

$$v_{\text{сеп}} = \frac{\Delta S}{\Delta t}.$$

Миттєвою швидкістю називають швидкість в будь-який момент часу або в будь-якій точці траєкторії. Їх визначають за формулою:

$$\vec{g} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{S}}{\Delta t} = \frac{d\vec{S}}{dt},$$

де ΔS і dS – нескінченно малі переміщення за нескінченно малі інтервали часу Δt , dt .

Вектор миттєвої швидкості збігається з дотичною до траєкторії руху і направлений в бік руху. Якщо швидкість тіла змінюється за величиною або напрямком, то такий рух характеризується прискоренням.

Прискорення – це векторна фізична величина, яка характеризує зміну швидкості за одиницю часу:

$$\vec{a} = \frac{\vec{g} - \vec{g}_0}{t},$$

де \vec{g}_0 - початкова швидкість,

\vec{g} - швидкість у кінці інтервалу часу t .

Оскільки прискорення – векторна величина, то незмінність у часі числового значення прискорення (модуля вектора) не означає, що рух прямолінійний. Одиниця прискорення в СІ - метр на секунду в квадраті – $[a] = \frac{m}{c^2}$.

Прямолінійний рівноприскорений рух – це такий рух тіла, під час якого напрям швидкості незмінний, а модуль швидкості за будь-які послідовні рівні інтервали часу змінюється на однакову величину. Для такого руху $a = const$, $g \sim t$, $a > 0$. Якщо $a = const$, $g \sim t$, $a < 0$, то рух буде рівносповільнений. Отже, прискорення цього руху \vec{a} - величина стала і визначається за формулою:

$$\vec{a} = \frac{\vec{g} - \vec{g}_0}{t}.$$

Миттєве прискорення визначається за формулою:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{g}}{\Delta t} = \frac{d\vec{g}}{dt}.$$

А середнє:

$$\vec{a}_c = \frac{\Delta \vec{g}}{\Delta t}.$$

Пройдений шлях при прямолінійному русі із сталим прискоренням:

$$S_2 = g_0 t + \frac{at^2}{2},$$

$$g = g_0 + at,$$

$$S = \frac{g^2 - g_0^2}{2a}.$$

Координата матеріальної точки при прямолінійному русі із сталим прискоренням:

$$x = x_0 + \mathcal{G}_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

Приклади розв'язування задач

1. Літак у момент відривання від Землі має швидкість 240 км/год і пробігає по бетонній доріжці відстань 790 м. Скільки часу триває розбіг і з яким прискоренням рухався при цьому літак?

Розв'язання

Дано	Врахуємо формулу зв'язку між миттєвими швидкостями, прискореннями і переміщенням для прямолінійного рівноприскореного руху: $S = \frac{\mathcal{G}^2 - \mathcal{G}_0^2}{2a}$,
$\mathcal{G}_1 = 240 \text{ км/год} \approx 66,7 \text{ м/с}$	
$S = 790 \text{ м}$	
$\mathcal{G}_0 = 0$	
$t - ?, a - ?$	

початкова швидкість - $\mathcal{G}_0 = 0$, тоді $\mathcal{G}^2 = 2aS$, звідки

$$a = \frac{\mathcal{G}^2}{2S} = \frac{66,7^2}{2 \cdot 790} = 28 \text{ м/с}^2.$$

Для рівноприскореного руху $\mathcal{G} = \mathcal{G}_0 + at$, $\mathcal{G}_0 = 0$, $\mathcal{G} = at$,

$$t = \frac{\mathcal{G}}{a} = \frac{66,7}{28} \approx 24 \text{ с.}$$

Відповідь: $a = 28 \text{ м/с}^2$, $t \approx 24 \text{ с}$.

2. Вийшовши із стану спокою, тіло рухалося рівноприскорено протягом 4 с, а потім наступні 6 с стало рухатися рівномірно і пройшло 18 м з тією швидкістю, якої воно набуло на кінець четвертої секунди. Визначити прискорення і шлях, пройдений тілом за весь час руху.

Розв'язання

Дано	Тіло послідовно бере участь у двох рухах: спочатку воно рухається рівноприскорено з початковою швидкістю, яка дорівнює нулю, а потім цей рух переходить у рівномірний. Кінцевою швидкістю рівноприскореного руху буде швидкість рівномірного руху $\mathcal{G} = \mathcal{G}_k$, загальний шлях:
$\mathcal{G}_0 = 0$	
$t_1 = 4 \text{ с}$	
$t_2 = 6 \text{ с}$	
$S_2 = 18 \text{ м}$	
$S_{\text{заг.}} - ?$	$S_{\text{заг.}} = S_1 + S_2.$
$a - ?$	

Шлях рівноприскореного руху - $S_1 = \frac{at_1^2}{2}$, а шлях рівномірного руху -

$$S_2 = \mathcal{G}_k t_2.$$

Врахувавши $\mathcal{G} = at_1 = \mathcal{G}_k$, отримаємо $S_2 = at_1 t_2$, звідки

$$a = \frac{S}{t_1 t_2} = \frac{18}{4 \cdot 6} = 0,75 \text{ м/с}^2.$$

Шлях, який тіло пройшло за перші 4с, буде рівний

$$S_1 = \frac{0,75 \cdot 46}{2} = 6 \text{ м}, \quad S_{\text{заг}} = 6 + 18 = 24 \text{ м}.$$

Відповідь: $a = 0,75 \text{ м/с}^2$, $S_{\text{заг}} = 24 \text{ м}$.

3. Переміщення тіла при рівноприскореному русі за перші два рівні послідовні інтервали часу по 2 с кожен відповідно дорівнюють 12 м і 32 м. Знайти початкову швидкість і прискорення тіла.

Розв'язання

Дано

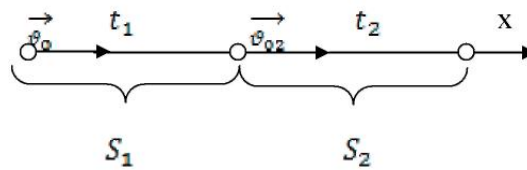
$$t_1 = t_2 = t = 2 \text{ с}$$

$$S_1 = 12 \text{ м}$$

$$S_2 = 32 \text{ м}$$

g - ?

a - ?



Кінцева швидкість, набута на проміжку S_1 за час t_1 , буде початковою на проміжку S_2 :

$$S_1 = g_0 t_1 + \frac{a t_1^2}{2}, \quad S_2 = g_0 t_2 + \frac{a t_2^2}{2}.$$

Враховавши $g_{02} = g_0 + at$, $t_1 = t_2 = t$, отримаємо:

$$S_1 = g_0 t_1 + \frac{a t_1^2}{2}, \quad (1)$$

$$S_2 = g_0 t_2 + \frac{a t_2^2}{2}, \quad (2)$$

$$g_{01} = g_0 + at. \quad (3)$$

Підставивши (3) в (2), отримаємо:

$$S_2 = g_0 t + at^2 + \frac{a t^2}{2} = g_0 t + \frac{3}{2} a t^2.$$

Звідки:

$$g_0 = \frac{S_2 - \frac{3}{2} a t^2}{t}. \quad (4)$$

Тепер підставимо (4) в (1): $S_1 = S_2 - \frac{3}{2} a t^2 + \frac{a t^2}{2} = S_2 - a t^2$,

$$a = \frac{S_2 - S_1}{t^2}, \quad \text{тоді } g_0 = \frac{S_2 - \frac{3}{2}(S_2 - S_1)}{t^2} = \frac{3S_1 - S_2}{2t},$$

$$a = \frac{32 - 12}{2^2} = 5 \text{ м/с}^2, \quad g_0 = \frac{3 \cdot 12 - 32}{2 \cdot 2} = 1 \text{ м/с}.$$

Відповідь: $a = 5 \text{ м/с}^2$, $g_0 = 1 \text{ м/с}$.

4. Потяг відійшов від станції і протягом 15 с рухався рівноприскорено. Знайти шлях, пройдений потягом за цей час, і швидкість його в кінці цього шляху, якщо відомо, що за 15-ту секунду потяг пройшов шлях на 2 м більший, ніж за попередню.

Розв'язання

Дано
 $t = 15$ с

$$S_{15} - S_{14} = 2 \text{ м}$$

$S = ?$ $v = ?$

Рух рівномірний без початкової швидкості, тому пройдений шлях:

$$S = \frac{at^2}{2}$$

Враховавши, що при рівноприскореному русі шляхи, що проходить тіло за рівні послідовні проміжки часу, відносяться один одного, як рядок послідовних непарних чисел, можна записати:

$$S_1 : S_{15} = 1 : 29 \quad \text{і} \quad S_1 : S_{14} = 1 : 27 \quad \text{звідки} \quad S_{14} = 27S_1, \quad \text{а} \quad S_{15} = 29S_1$$

Враховавши $S_{15} - S_{14} = 2$ м, ,

отримаємо: $S_1 = 1$ м, $S = \frac{at^2}{2}$, $t_1 = 1$ м, $a = \frac{2S_1}{t_1^2} = \frac{2 \cdot 1}{1^2} = 2$ м/с².

Підставивши числові значення прискорення a і часу t у формулу для шляху $S = \frac{at^2}{2}$, отримаємо: $S = \frac{2 \cdot 15^2}{2} = 225$ м. Швидкість потягу в кінці 15-ї секунди обчислюється:

$$v = at_{15} = 2 \cdot 15 = 30 \text{ м/с.}$$

Відповідь: $S = 225$ м, $v = 30$ м/с.

Задачі для самостійного розв'язування

1. Перший вагон поїзда, що від'їжджає від зупинки, проходить за 3 с повз спостерігача, який стояв, коли поїзд рушив, біля початку цього вагона. За який час повз спостерігача пройде весь поїзд, що складається з 9 вагонів? Проміжками між вагонами знехтувати.

Відповідь: $t = 9$ с.

2. Рухи двох автомобілів по шосе описуються рівняннями: $x_1 = 2t + 0.2t^2$ і $x_2 = 80 - 4t$. Описати картину руху, визначити час і місце зустрічі автомобілів, відстань між ними через 5 с, координату першого автомобіля в той момент часу, коли другий перебував у початковій точці відліку.

Відповідь: $t_3 = 10$ с, $x_3 = 40$ м, $S = 40$ м, $x_1 = 120$ м.

3. Велосипедист перші 4 с рухався із стану спокою з прискоренням 1 м/с^2 , а потім 0,1 хв їхав рівномірно і останні 20 м, доки не зупинився, рівносповільнено. Обчислити середню швидкість за весь час руху. Побудувати графік $v_x(t)$.

Відповідь: $v = 2,6$ м/с.

4. Рухи матеріальних точок задано такими рівняннями:

а) $x_1 = 10t + 0.4t^2$, б) $x_2 = 2t + t^2$,

в) $x_3 = -4t + 2t^2$, г) $x_4 = -t - 6t^2$.

Написати залежність $\vartheta = \vartheta(t)$ для кожного випадку; побудувати графіки цих залежностей; визначити вид руху в кожному випадку.

Відповідь: а) $\vartheta_{1x} = 10 + 0.8t$ - прискорений;

б) $\vartheta_{2x} = 2 - 2t$ - сповільнений, через 1 с прискорений;

в) $\vartheta_{3x} = -4 + 4t$ - сповільнений, через 1 с прискорений;

г) $\vartheta_{4x} = -1 - 12t$ - прискорений.

5. Матеріальна точка рухається прямолінійно. Залежність пройденого шляху від часу описується рівнянням $S = 0.5t + t^2$, де S – шлях, м; t – час, с. Визначити залежність швидкості ϑ і прискорення a від часу, середню швидкість $\overline{\vartheta}_c$ точки за другу секунду руху та шлях S_1 , який пройшла точка за п'яту секунду.

Відповідь: $\vartheta = 0,5 + 2t$ м/с, $a = 2$ м/с², $\vartheta_c = 3,5$ м/с, $S = 9,5$ м.

6. З одного і того ж місця розпочали рівноприскорено рухатися в одному напрямку два тіла. Друге тіло розпочало свій рух на 2 с пізніше першого. Перше тіло рухалося з початковою швидкістю $\vartheta_1 = 1$ м/с і прискоренням $a_1 = 2$ м/с², друге - з початковою швидкістю $\vartheta_2 = 10$ м/с і прискоренням $a_2 = 1$ м/с². Через скільки часу і на якій відстані від початкового положення друге тіло наздожене перше?

Відповідь: $t_1 = 3,4$ с, $t_2 = 10,6$ с, $x_1 = 15$ м, $x_2 = 123$ м.

7. Рухаючись рівноприскорено, тіло проходить за 5 с шлях 0,3 м, а за наступні 5 с - шлях 0,8 м. Визначити початкову швидкість і прискорення.

Відповідь: $a = 0,02$ м/с², $\vartheta_0 = 1$ м/с.

8. Під час пробивання дошки швидкість кулі зменшилась з 800 м/с до 600 м/с. Товщина дошки 8 см. Скільки часу куля рухалась всередині дошки?

Відповідь: $t = 1,1 \cdot 10^{-4}$ с.

1.1.3 Вільне падіння

Рух тіла під дією тільки сили тяжіння називається *вільним падінням*. Вільне падіння відбувається з прискоренням, яке називається прискоренням вільного падіння. При розв'язуванні задач прискорення вільного падіння поблизу поверхні Землі рівне $g = 9,8$ м/с².

1. Якщо початкова швидкість дорівнює нулю ($\vartheta_0 = 0$), то

$$\begin{cases} \mathcal{G} = gt, \\ h = h_0 - \frac{gt^2}{2}, \\ t = \sqrt{\frac{2h_0}{g}}, \end{cases}$$

де h_0 – початкова висота,

t – час падіння,

\mathcal{G} – швидкість тіла у момент часу t .

2. Початкова швидкість напрямлена вертикально вгору:

$$\begin{cases} \mathcal{G} = \mathcal{G}_0 - gt, \\ h = h_0 + \mathcal{G}_0 t - \frac{gt^2}{2}, \\ t = \frac{\mathcal{G}_0}{g} - \text{час польоту вгору}, \\ t = \sqrt{\frac{2h_{\max}}{g}} - \text{час польоту вниз}, \end{cases}$$

де h_{\max} – максимальна висота, якої досягає тіло.

Максимальна висота буде розраховуватися так $h_{\max} = h_0 + \frac{\mathcal{G}_0^2}{2g}$.

Приклади розв'язування задач

1. Тіло кинуте вертикально вгору зі швидкістю 30 м/с. Знайти, через який час тіло буде на висоті 25 м; максимальну висоту підняття; час піднімання і час падіння; висоту, на якій швидкість тіла зменшиться у два рази.

Розв'язання

Дано

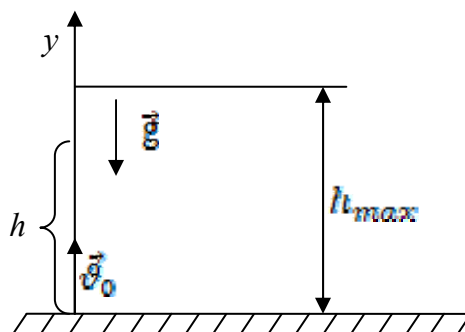
$$\mathcal{G}_0 = 30 \text{ м/с}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$\mathcal{G}_1 = 0 \text{ м/с}$$

$$\mathcal{G}_2 = \frac{\mathcal{G}}{2} \text{ м/с}, h = 25 \text{ м}$$

$$t_1 - ?, t_2 - ?, h - ?, h_{\max} - ?$$



Початок координат розмістимо у точці на Землі, з якої тіло кинуте вгору. Координата y тіла збігається з висотою h . Прискорення g направлене вниз.

$$h = g_0 t - \frac{gt^2}{2}.$$

Підставивши числові значення і розв'язавши квадратне рівняння, отримаємо: $5t^2 - 30t + 25 = 0$, $D = 400$,

$$t'_1 = \frac{30+20}{10} = 5 \text{ с}, \quad t'_2 = \frac{30-20}{10} = 1 \text{ с}.$$

Дві відповіді говорять про те, що на даній висоті тіло побувало двічі: один раз - при підніманні, а другий - при падінні.

У найвищій точці кінцева швидкість дорівнює нулю.

$$\frac{g^2 - g_0^2}{-2g} = h_{max}.$$

Час піднімання – це буде інтервал часу, через який миттєва швидкість стане рівною нулю.

$$g = g_0 - gt, \quad g_0 = gt_2, \quad t_2 = \frac{g_0}{g} = \frac{30}{10} = 3 \text{ с}.$$

Час падіння дорівнює часу піднімання.

Для визначення висоти, на якій швидкість зменшиться вдвічі, використаємо формулу: $g_0^2 - g_2^2 = 2gh$, $g_2 = \frac{g_0}{2}$.

$$g_0^2 - \frac{g_0^2}{4} = 2gh,$$

$$h = \frac{g_0^2 - \frac{g_0^2}{4}}{2g} = \frac{3g_0^2}{8g} = \frac{3 \cdot 30^2}{8 \cdot 10} = 33,75 \text{ м}.$$

Відповідь: $t'_1 = 5 \text{ с}$, $t'_2 = 1 \text{ с}$, $h_{max} = 45 \text{ м}$, $t_2 = 3 \text{ с}$, $h = 33,75 \text{ м}$.

2. На деякій ділянці шляху швидкість тіла, що вільно падає, збільшилась від 7 м/с до 21 м/с. Знайти час, протягом якого відбулась зміна швидкості, і шлях, пройдений тілом за цей час.

Розв'язання

Дано
 $g_0 = 7 \text{ м/с}$
 $g = 21 \text{ м/с}$

$t - ?$
 $h - ?$

Час руху знайдемо за формулою:

$$t = \frac{g - g_0}{g} = \frac{21 - 7}{10} = 1,4 \text{ с}.$$

Пройдений тілом шлях знайдемо за формулою:

$$h = g_0 t + \frac{gt^2}{2} = 7 \cdot 1,4 + \frac{10 \cdot 1,4^2}{2} = 19,6 \text{ м}.$$

Відповідь: $t = 1,4 \text{ с}$, $h = 19,6 \text{ м}$.

3. З одної й тої ж самої точки падають два тіла. Друге тіло розпочало падати на 3 с пізніше першого. Визначити відстань між тілами через 10 с після падіння першого тіла і знайти, в скільки разів швидкість першого тіла більша швидкості другого в цей же момент часу.

Розв'язання

Дано $t_1 = 10$ с $t_2 = 7$ с	Відстань між тілами $S = h_1 - h_2$ де h_1 та h_2 – шлях, що пройшло тіло за 10 с і 7 с вільного падіння.
$S - ?$ $n - ?$	$S = \frac{gt_1^2}{2} - \frac{gt_2^2}{2} = \frac{g}{2}(t_1^2 - t_2^2) = \frac{9,8}{2}(10^2 - 7^2) = 250 \text{ м.}$

Швидкість першого тіла в кінці 10-ї секунди і швидкість другого тіла в кінці 7-ї с після початку руху відносяться:

$$h = \frac{gt_1}{gt_2} = \frac{t_1}{t_2} = \frac{10}{7} = 1,4 \text{ рази.}$$

Відповідь: $S = 250$ м, $n = 1,4$ рази.

4. За останню секунду вільного падіння тіло пройшло половину свого шляху. З якої висоти h і скільки часу падало тіло?

Розв'язання

Дано $\Delta t = 1$ с $h_2 = \frac{h}{2}$	
$h - ?$ $t - ?$	

Довжина шляху

$$h = AC = \frac{gt^2}{2}, \quad \frac{AB}{2} = \frac{g(t-1)^2}{2},$$

де t – час падіння тіла з точки А в точку С. Розв'язавши дану систему рівнянь, отримаємо:

$$2 = \frac{t^2}{(t-1)^2}, \quad t \approx 3,4 \text{ с,}$$

$$h = \frac{gt^2}{2} = \frac{9,8 \cdot 3,4^2}{2} = 57,7 \text{ м.}$$

Дану задачу можна розв'язати іншим способом.

Рівняння руху АВ має вигляд:

$$\frac{h}{2} = \frac{gt_1^2}{2},$$

де t_1 – час руху від А до В.

Для ВС:

$$\frac{h}{2} = g_0 t_2 - \frac{gt_1^2}{2},$$

де $g_0 = \sqrt{2g \frac{h}{2}}$ – швидкість тіла в точці В, а $t_2 = \Delta t = 1$ – час руху від В

до С. Повний час $t = t_1 + t_2 = t_1 + \Delta t = t_1 + 1$.

Розв'язавши дану систему рівнянь, отримаємо таку ж саму відповідь.

Відповідь: $h \approx 57,7$ м, $t \approx 3,4$ с.

Задачі для самостійного розв'язування

1. Одне тіло вільно падає з якоїсь висоти h_1 , одночасно з ним починає падати друге тіло з більшої висоти h_2 . Яку початкову швидкість v_0 повинно мати друге тіло, щоб вони обоє упали одночасно?

Відповідь: $v_0 = \frac{h_2 - h_1}{2h_1} \sqrt{2gh_1}$.

2. У скільки разів треба збільшити початкову швидкість кинутого вгору тіла, щоб висота, на яку воно підніметься, збільшилася в 4 рази?

Відповідь: в два рази.

3. Тіло вільно падає з висоти 80 м. Яке його переміщення за останню секунду падіння?

Відповідь: 35 м.

4. Снаряд зенітної гармати, випущений вертикально вгору із швидкістю 800 м/с, досяг цілі через 6 с. На якій висоті перебував літак противника і яка швидкість снаряда в момент досягання цілі?

Відповідь: $h = 4620$ м, $v = 740$ м/с.

5. Тіло, кинуте вертикально вгору з початковою швидкістю $v = 21$ м/с, було на половині свого найвищого підняття двічі. Визначити проміжок часу Δt між цими двома моментами.

Відповідь: $\Delta t = \frac{\sqrt{2}v}{g} = 3,03$ с.

6. Вертикально вгору з початковою швидкістю $v_0 = 20$ м/с кинули камінь. Через $t = 1$ с після цього кинули вертикально вгору другий камінь з такою ж швидкістю. На якій висоті h зустрінуться камені?

Відповідь: $h = 19,2$ м.

7. З якої висоти h упало тіло, якщо останній метр свого шляху воно пройшло за час $t = 0,1$ с?

Відповідь: $h = 5,61$ м.

8. Два тіла кинули вертикально вгору з однієї точки одне за другим з інтервалом часу в $\tau = 2$ с з однаковими початковими швидкостями $v_0 = 10$ м/с. Через скільки часу обидва тіла зустрінуться?

Відповідь: $t = \frac{v_0}{g} + \frac{\tau}{2} \approx 2$ с.

1.1.4 Обертальний рух тіла навколо нерухомої осі

Рух, траєкторія якого крива лінія, називають криволінійним. Наприклад, рух по колу, еліпсу, параболі, гіперболі. Обертальний рух тіла навколо осі – це рух, при якому траєкторією руху усіх його точок є кола з центром, що лежать на одній прямій, яка називається *віссю обертання*. Миттєва швидкість направлена по дотичній до траєкторії (завжди перпендикулярна до радіуса). Рух тіла по коловій траєкторії є окремим випадком криволінійного руху. Такий рух завжди буде прискореним, оскільки швидкість

буде змінюватись за напрямком. Тому тіло має нормальне прискорення, яке напрямлене перпендикулярно до швидкості в даній точці, тобто вздовж радіуса кривизни траєкторії. Якщо змінюється й модуль швидкості, то тіло також має і тангенціальне прискорення (рис. 4).

Повне прискорення \vec{a} матеріальної точки дорівнює векторній сумі її тангенціального і нормального прискорення:

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

Модуль прискорення точки:

$$|\vec{a}| = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}.$$

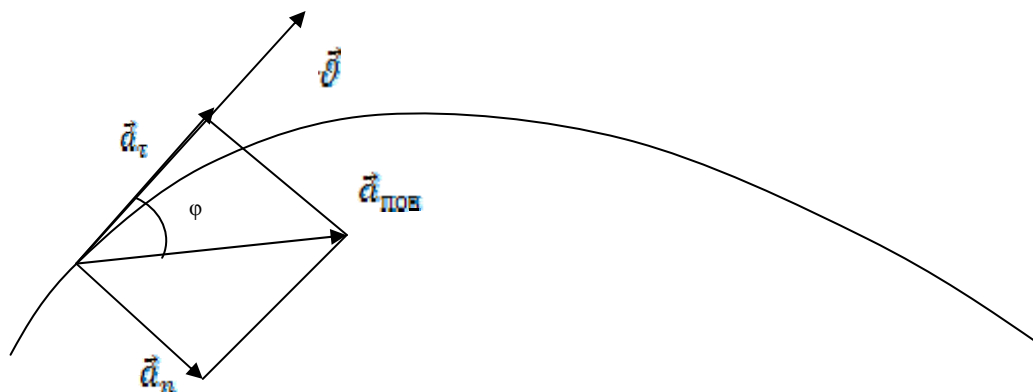


Рисунок 4

Напрямок повного прискорення визначається кутом φ .

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{a_n}{a_\tau}.$$

Зміну положення матеріальної точки під час руху по колу характеризують довжиною дуги або кутом повороту. Кут повороту (кутове переміщення) φ – скалярна фізична величина, яка характеризує зміну положення тіла в просторі при обертальному русі і вимірюється кутом повороту радіуса, який проведено від осі обертання до певної точки тіла, що обертається. Одиниця кута в СІ – радіан:

$$[\varphi] = 1 \text{ рад}, \quad 1 \text{ рад} = 57,3^\circ.$$

Частота обертання n – скалярна фізична величина, яка характеризує швидкість обертального руху і вимірюється відношенням кількості обертів до інтервалу часу, протягом якого вони здійснені.

$$n = \frac{N}{t}.$$

Одиниця частоти обертання в СІ – герц.

$$[n] = \text{с}^{-1} = \text{Гц}.$$

Час одного оберта називається *періодом*:

$$T = \frac{1}{n}, \quad [T] = \text{с}.$$

Модуль лінійної швидкості матеріальної точки при рівномірному русі по колу:

$$g = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi Rn,$$

де R - радіус кола.

Кутова швидкість ω - кут повороту радіуса, проведеного до певної точки тіла, що обертається за одну секунду:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}, \text{ або } \omega = \frac{\varphi}{t}.$$

Одиниця кутової швидкості в СІ – радіан за секунду $[\omega] = \text{рад/с}$.

$$g = \omega R.$$

Модуль кутової швидкості при рівноприскореному русі тіла по колу:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi n.$$

При рівномірному русі по колу тіло має тільки нормальне прискорення, яке завжди напрямлене до центра кола по радіусу і називається доцентровим прискоренням:

$$a = \frac{g^2}{R} = \omega^2 R.$$

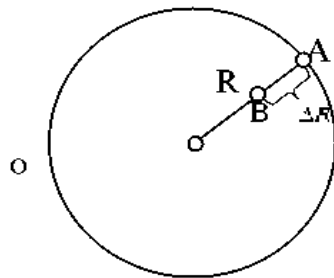
Приклади розв'язування задач

1. Лінійна швидкість v_1 точок на поверхні диска, який обертається, рівна 3 м/с. Точки, розміщені на $\Delta R = 10$ см, ближче до осі мають лінійну швидкість $v_2 = 2$ м/с. Визначити частоту обертання диска n .

Розв'язання

Дано
 $v_1 = 3$ м/с
 $v_2 = 2$ м/с
 $\Delta R = 10$ см

$n = ?$



Частоти обертання точок, що знаходяться на відстані A і на відстані B від осі обертання, будуть однаковими:

$$n_1 = n_2 = n = \frac{\omega}{2\pi},$$

$$v_1 = \omega_1 R_1, \quad v_2 = \omega_2 (R - \Delta R),$$

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega, \text{ тоді } \frac{v_1}{R} = \frac{v_2}{R - \Delta R}, R = \frac{v_1 \Delta R}{v_1 - v_2} = \frac{3 \cdot 0,1}{3 - 2} = 0,3 \text{ м,}$$

$$\omega = \frac{v_1}{R_1} = \frac{3}{0,3} = 10 \text{ рад/с, } n = \frac{10}{2 \cdot 3,14} = 1,59 \text{ об/с.}$$

Відповідь: $n = 1,59$ об/с.

2. Три літаки описують дуги, рухаючись на відстані 120 м один від одного. Середній літак має прискорення 2 м/с² і рухається по дузі, радіус якої 900 м. Визначити швидкість кожного літака.

Розв'язання

Дано
 $a = 10 \text{ м/с}^2$
 $R_2 = 900 \text{ м}$
 $\Delta R = 120 \text{ м}$

$\vartheta_1 - ?$, $\vartheta_2 - ?$
 $\vartheta_3 - ?$

Для всіх літаків кутова швидкість буде однакою, оскільки всі три літаки рухаються по концентричних колах.

$$\omega = \frac{\vartheta_1}{R_1}, \quad \omega = \frac{\vartheta_2}{R_2}, \quad \omega = \frac{\vartheta_3}{R_3}.$$

Врахувавши, що доцентрове прискорення другого літака:

$$a_{\text{д}} = \frac{g^2}{R_2} = \omega^2 R_2, \text{ легко визначити кутову швидкість:}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{a_{\text{д}}}{R_2}} = \sqrt{\frac{10}{900}} = 0,1054 \text{ рад/с.}$$

Тоді $\vartheta_2 = 0,1054 \cdot 900 = 94,87 \text{ м/с}$.

$$R_1 = R_2 - \Delta R = 900 - 120 = 780 \text{ м}; \quad \vartheta_1 = 0,1054 \cdot 780 = 82,2 \text{ м/с};$$

$$R_3 = R_2 + \Delta R = 900 + 120 = 1020 \text{ м}; \quad \vartheta_3 = 0,1054 \cdot 1020 = 107,5 \text{ м/с}.$$

Відповідь: $\vartheta_1 = 82,2 \text{ м/с}$; $\vartheta_2 = 94,87 \text{ м/с}$; $\vartheta_3 = 107,5 \text{ м/с}$.

3. Мотоцикліст рухається по дорозі, що має закруглення, з лінійною швидкістю $\vartheta = 100 \text{ км/год}$. Визначити доцентрове прискорення мотоцикліста, а також його кутову швидкість, якщо заокруглення має вигляд півкола довжиною 160 м.

Розв'язання

Дано
 $\vartheta = 100 \text{ км/год}$
 $\Delta S = 160 \text{ м}$
 $a_{\text{д}} - ?$, $\omega - ?$

$\vartheta = 100 \text{ км/год} \approx 27,78 \text{ м/с}$. Для руху по колу:

$$a_{\text{д}} = \frac{g^2}{R} = \omega^2 R, \quad \vartheta = \omega R. \text{ Звідки } \omega = \frac{\vartheta}{R}.$$

Радіус заокруглення R знайдемо із довжини дуги

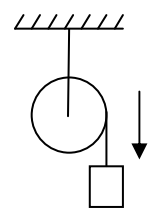
$$\text{(півкола): } \Delta S = \pi R, \quad R = \frac{\Delta S}{\pi}.$$

Тоді $\omega = \frac{\vartheta}{\Delta S} \cdot \pi = \frac{27,78 \cdot 3,14}{160} = 0,546 \text{ рад/с}$, а доцентрове прискорення:

$$a_{\text{д}} = \omega^2 R = 0,545^2 \cdot \frac{160}{3,14} \approx 15,14 \text{ м/с}^2.$$

Відповідь: $a_{\text{д}} \approx 15,14 \text{ м/с}^2$, $\omega = 0,546 \text{ рад/с}$.

4. Шків радіусом $R = 20 \text{ см}$, обертається під дією вантажу, що підвішений до нитки, яка розмотується. В початковий момент часу вантаж був нерухомий, а потім почав опускатися з прискоренням $a = 0,02 \text{ м/с}^2$. Визначити кутову швидкість шківа в той момент, коли вантаж пройде шлях $S = 1 \text{ м}$. Визначити



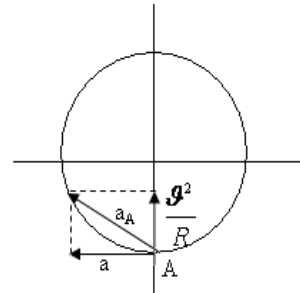
величину і напрямок прискорення точки А в цей момент (див. рисунок).

Розв'язання

Дано $R = 0,2 \text{ м}$ $a = 0,02 \text{ м/с}^2$ $S = 1 \text{ м}$ $\alpha_A - ?, \omega - ?$	Лінійна швидкість точок поверхні шківів в будь-який момент часу рівна лінійній швидкості вантажу, тому: $g = \sqrt{2aS} = \sqrt{2 \cdot 0,02 \cdot 1} = 0,2 \text{ м/с.}$ Кутова швидкість: $\omega = \frac{g}{R} = \frac{0,2}{0,2} = 1 \text{ рад/с.}$
--	---

Повне прискорення точки А буде дорівнювати сумі прискорення a і доцентрового прискорення $\frac{g^2}{R}$:

$$a_A = \sqrt{a^2 + \left(\frac{g^2}{R}\right)^2} = \sqrt{a^2 + \frac{4a^2 S^2}{R^2}} = \sqrt{0,02^2 + \frac{4 \cdot 0,02^2 \cdot 1^2}{0,2^2}} = 0,2 \text{ м/с.}$$



Відповідь: $\omega = 1 \text{ рад/с}$, $a_A = 0,2 \text{ м/с}$.

Задачі для самостійного розв'язування

1. Лінійна швидкість точок робочої поверхні наждачного круга, який має діаметр 300 мм, не повинна перевищувати 35 м/с. Чи можна насадити на цей круг вал електродвигуна, що робить 1400 об/хв? Що робить 2800 об/хв?

Відповідь: так; ні.

2. Радіус рукоятки криничного коловороту в 3 рази більший від радіуса вала, на який намотується трос. Яка лінійна швидкість кінця рукоятки під час піднімання відра з глибини 10 м за 20 с?

Відповідь: 1,5 м/с.

3. Якщо радіус колової орбіти штучного супутника Землі збільшити в 4 рази, то його період обертання збільшиться у 8 разів. У скільки разів зміниться швидкість руху супутника по орбіті?

Відповідь: зменшиться у 2 рази.

4. Хвилинка стрілка годинника у три рази довша від секундної. Обчислити співвідношення лінійних швидкостей кінців стрілок.

Відповідь: 1:20.

5. Яку відстань проїде велосипедист, зробивши педалями 60 обертів, якщо діаметр колеса велосипеда дорівнює 70 см, ведуча зубчатка має 48 зубців, а ведена - 18 зубців?

Відповідь: $S = 350 \text{ м}$.

6. Яка швидкість різання, якщо токарь витрачає 56,6 с на обробку на токарному верстаті сталюого циліндра діаметром 0,006 м і завдовжки 0,7 м при подачі різця 0,5 мм за один оберт?

Відповідь: $g_2 = 46,6 \cdot 10^{-2}$ м/с.

7. Хлопчик обертає камінь, прив'язаний до мотузки довжиною 0,6 м, у вертикальній площині, роблячи 4 об/с. На яку висоту підніметься камінь, якщо мотузка обривається в той момент, коли швидкість каменя напрямлена вертикально вгору?

Відповідь: 11,6 м.

8. При обертанні диск радіусом 0,1 м робить 5 об/с. Визначити доцентрове прискорення точок на ободі колеса і точок, що знаходяться на половині радіуса, а також кутову швидкість обертання диска.

Відповідь: $a_1 = 98,6$ м/с², $a_2 = 98,6$ м/с², $\omega = 31,4$ рад/с.

1.1.5 Рух тіла, кинутого під кутом до горизонту. Рух тіла, кинутого горизонтально

Даний рух тіла можна розглядати як суму двох рухів: в горизонтальному напрямі – рівномірного і у вертикальному напрямі – рівноприскореного.

Нехай тілу надали початкової швидкості g_0 під кутом α до горизонту (рис.5).

Знайдемо

1. Траєкторію руху тіла.
2. Найбільшу висоту підняття тіла над горизонтом.
3. Дальність польоту.

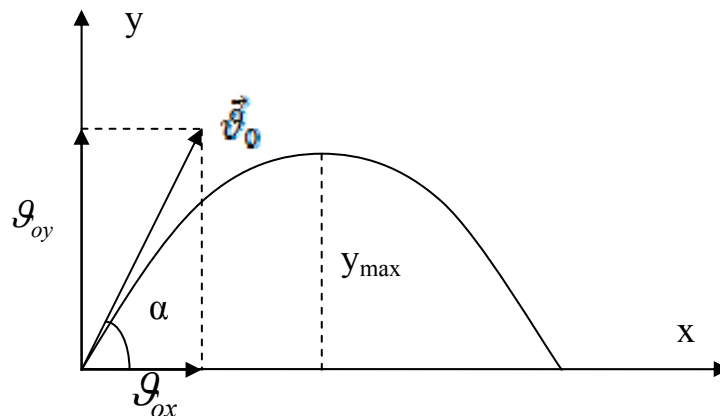


Рисунок 5

Спроектуємо вектор \vec{g}_0 на координатні осі x і y:

$$g_{ox} = g_0 \cos \alpha, \quad g_{oy} = g_0 \sin \alpha.$$

Тоді координати точки для будь-якого моменту часу будуть:

$$x = g_0 \cos \alpha \cdot t, \tag{1}$$

$$y = g_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{gt^2}{2}.$$

Якщо з рівнянь (1) виключимо час, то дістанемо рівняння траєкторії:

$$t = \frac{x}{g_0 \cos \alpha};$$

$$y = \operatorname{tg} \alpha \cdot x - \frac{gx^2}{2g_0^2 \cos^2 \alpha}.$$

Отже, тіло летітиме по параболічній траєкторії.

У кінці польоту тіла координата $y=0$, час t польоту знайдемо за формулою для y :

$$0 = g_0 t \sin \alpha - \frac{gt^2}{2}.$$

Розв'язавши квадратне рівняння відносно t , знайдемо:

$$t_1 = 0, \quad t_2 = \frac{2g_0 \sin \alpha}{g}.$$

Значення $t_1 = 0$ відповідає початку польоту (у цей момент координата y також дорівнює нулю), а t_2 - це шуканий час польоту:

$$t_{\text{польоту}} = \frac{2g_0 \sin \alpha}{g}.$$

Час руху до найвищої точки траєкторії вдвічі менший від усього часу руху.

$$t_{\text{піднімання}} = \frac{g_0 \sin \alpha}{g}.$$

Підставивши час піднімання в y , отримаємо:

$$h_{\max} = y_{\max} = g_0 \sin \alpha \cdot \frac{g_0 \sin \alpha}{g} - \frac{g}{2} \left(\frac{g_0 \sin \alpha}{g} \right)^2 = \frac{g_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}.$$

Дальність польоту l - це максимальне значення координати x , яке дістанемо, коли до формули для координати x замість t підставимо час польоту:

$$t_{\text{польоту}} = \frac{2g_0 \sin \alpha}{g},$$

$$l = x_{\max} = g_0 \cos \alpha \frac{2g_0 \sin \alpha}{g} = \frac{2g_0^2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{g}.$$

Врахувавши $2 \sin \alpha \cos \alpha = \sin 2\alpha$. Отже, $l = \frac{g_0^2 \sin 2\alpha}{g}$.

h - у будь-який момент часу:

$$h = g_0 t \sin \alpha - \frac{gt^2}{2}.$$

Рух тіла, кинутого горизонтально, є окремим випадком руху тіла, кинутого під кутом до горизонту (рис.6).

За початок відліку координат візьмемо точку, де було скинуто вантаж. Вісь X спрямуємо горизонтально, а вісь Y - вертикально вгору.

Тоді $x = v_0 t \cos \alpha, y = v_0 t \sin \alpha - \frac{gt^2}{2}$.

В даній задачі $\alpha = 0$, тоді рівняння матимуть вигляд:

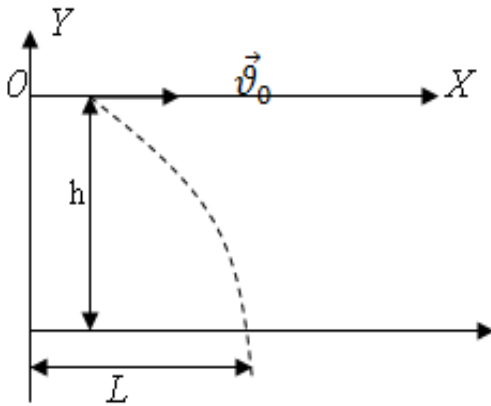
$$x = v_0 t, y = -\frac{gt^2}{2}$$

У момент приземлення вантажу $y = -h$, тоді час польоту тіла:

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

Дальність польоту:

$$L = x = v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}}$$



Швидкість у будь – який момент часу:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

Приклади розв'язування задач

- Тіло, що було кинуте горизонтально з висоти 19,6 м, впало на землю на відстані 80 м від місця кидання. Визначити швидкість кидання і кут, який утворює вектор швидкості в момент падіння з горизонтом.

Розв'язання

Дано
 $H = 19,6$ м
 $S = 80$ м

В даному випадку - складний рух. Рух по горизонталі – рівномірний із швидкістю $v_x = v_0$, а рух по вертикалі – рівноприскорений $a_y = g$.

$v_0 = ?$, $\alpha = ?$

Для рівномірного руху: $v_0 = v_x = \frac{S}{t}$. Час руху по горизонталі буде

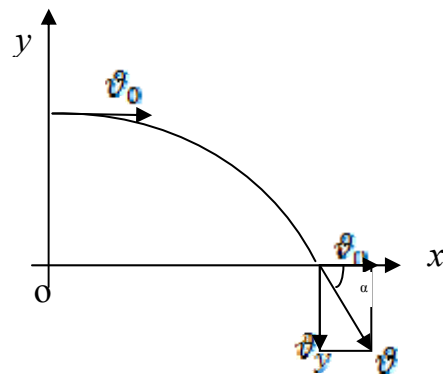
такий самий, як і по вертикалі. Врахувавши, що $H = \frac{gt^2}{2}$, виключимо час

$t = \sqrt{\frac{2H}{g}}$ і визначимо початкову

швидкість:

$$v_0 = \frac{S}{\sqrt{\frac{2H}{g}}} = \frac{80}{\sqrt{\frac{2 \cdot 19,6}{9,8}}} = 40 \text{ м/с, а}$$

$$\tan \alpha = \frac{v_y}{v_x}$$



$$v_y = \sqrt{2gH} = \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 19,6} = 19,6 \text{ м/с},$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{19,6}{40} = 0,49, \quad \alpha = \operatorname{arctg} 0,49 = 26^\circ 10'.$$

Відповідь: $v_0 = 40 \text{ м/с}$, $\alpha = 26^\circ 10'$.

2. Тіло кинуте під кутом 60° до горизонту з швидкістю 20 м/с . Визначити швидкість тіла через 2 с , а також модуль його переміщення за цей інтервал часу.

Розв'язання

Дано

$$\alpha = 60^\circ$$

$$v_0 = 20 \text{ м/с}$$

v —?, S —?

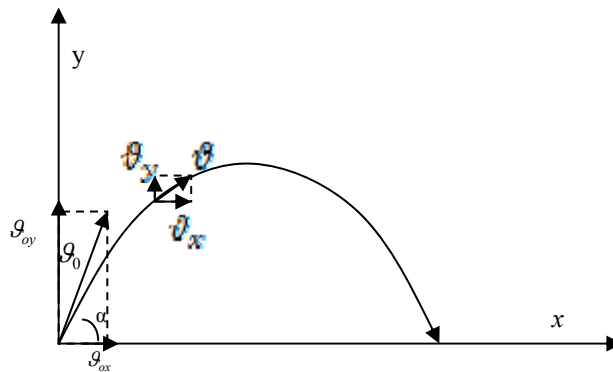
Рівняння руху у проекціях на координатні осі мають вигляд: $v_x = v_{0x} + a_x t$,

$$S_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}, \quad v_y = v_{0y} + a_y t, \quad S_y = v_{0y} t + \frac{a_y t^2}{2}.$$

З рисунка видно:

$$v_{0x} = v_0 \cos \alpha, \quad a_x = 0, \quad a_y = -g, \quad S_x = l, \quad S_y = h,$$

$$v_x = v_{0x}, \quad v_x = v_0 \cos \alpha, \quad v_y = v_0 \sin \alpha - gt, \quad l = v_0 t \cos \alpha, \quad h = v_0 \sin \alpha \cdot \frac{gt^2}{2}.$$



Швидкість v і модуль переміщення визначимо за теоремою Піфагора: $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{(v_0 \cos \alpha)^2 + (v_0 \sin \alpha - gt)^2}$,

$$S = \sqrt{l^2 + h^2} = \sqrt{(v_0 t \cos \alpha)^2 + \left(v_0 t \sin \alpha - \frac{gt^2}{2} \right)^2},$$

$$v = \sqrt{(20 \cdot 0,5)^2 + (20 \cdot 0,866 - 9,8 \cdot 2)^2} = 10,2 \text{ м/с},$$

$$S = \sqrt{(20 \cdot 2 \cdot 0,5)^2 + \left(20 \cdot 2 \cdot 0,866 - \frac{9,8 \cdot 2^2}{2} \right)^2} = 25 \text{ м}.$$

Відповідь: $S = 25 \text{ м}$, $v = 10,2 \text{ м/с}$.

3. На високому березі озера знаходиться кулемет, який стріляє в горизонтальному напрямку. Початкова швидкість кулі 800 м/с . Яку швидкість буде мати куля при падінні у воду, якщо висота берега 30 м ?

Розв'язання

Дано
 $h = 30$ м
 $v_0 = 800$ м/с
 $v = ?$

Оскільки $v_x = v_0$, $v_y = \sqrt{2gh}$, то швидкість кулі при падінні у воду $v = \sqrt{v_0^2 + 2gh} = \sqrt{800^2 + 2 \cdot 9,8 \cdot 30} = 800,4$ м/с.

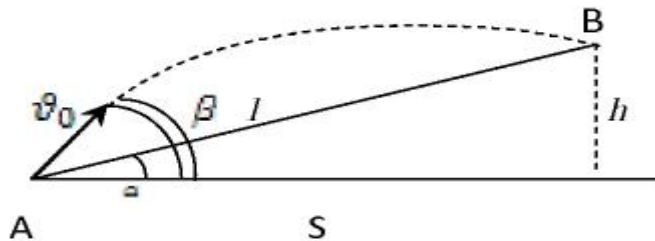
Відповідь: 800,4 м/с.

4. Із міномета обстрілюють об'єкт, який розміщений на схилі гори. На якій відстані l будуть падати міни, якщо початкова швидкість їх v_0 , кут нахилу гори $\alpha = 30^\circ$, а кут, під яким стріляють, $\beta = 60^\circ$ відносно горизонту?

Розв'язання

Дано
 $\alpha = 30^\circ$
 $\beta = 60^\circ$
 v_0
 $l = ?$

Криволінійний рух міни по параболі можна розкласти на два прямолінійних рухи: по горизонталі і вертикалі. Переміщення будемо відраховувати від точки А. Початкові швидкості: по горизонталі - $v_1 = v_0 \cos \beta$; по вертикалі - $v_2 = v_0 \sin \beta$.



Рівняння руху по горизонталі: $S = v_1 t = v_0 t \cos \beta$, (1)

по вертикалі: $h = v_2 t - \frac{gt^2}{2} = v_0 t \sin \beta - \frac{gt^2}{2}$. (2)

З рисунка видно, що $S = l \cos \alpha$, $h = l \sin \alpha$. Підставивши S і h в рівняння (1) і (2), отримаємо: $l = \frac{2v_0^2 (\sin \beta \cos \alpha - \cos \beta \sin \alpha) \cos \beta}{g \cos^2 \alpha}$.

Врахувавши $\beta = 2\alpha$, отримаємо: $l = \frac{2v_0^2 \sin \alpha \cos 2\alpha}{g \cos^2 \alpha}$.

Відповідь: $l = \frac{2v_0^2 \sin \alpha \cos 2\alpha}{g \cos^2 \alpha}$.

Задачі для самостійного розв'язування

1. Хлопчик кинув горизонтально м'яч з вікна, розташованого на висоті 20 м. Скільки часу летів м'яч до землі і з якою швидкістю його було кинуте, якщо він упав на відстані 6 м від фундаменту будинка?

Відповідь: $t = 2$ с, $v = 3$ м/с.

2. Снаряд, що вилетів з гармати під кутом до горизонту, перебуває у польоті 12 с. Якої найбільшої висоти він досяг?

Відповідь: $h = 180$ м.

3. Дальність польоту тіла, кинутого в горизонтальному напрямі зі швидкістю $g = 10$ м/с, дорівнює висоті кидання. З якої висоти кинуте тіло?

Відповідь: $h = 20$ м.

4. Під яким кутом α до горизонту потрібно кинути тіло, щоб при початковій швидкості v_0 дальність польоту була найбільшою?

Відповідь: $\alpha = 45^\circ$.

5. Під яким кутом до горизонту потрібно направити струмінь води, щоб висота його піднімання була рівною дальності?

Відповідь: $\alpha = 76^\circ$.

6. З вишки кинули камінь в горизонтальному напрямку. Через проміжок часу $t = 2$ с камінь упав на землю на відстані $S = 40$ м від основи вишки. Визначити початкову швидкість v_0 і кінцеву швидкість v каменя.

Відповідь: $v_0 = 20$ м/с, $v = 28$ м/с.

7. М'яч кинуте горизонтально з балкона, який знаходиться на висоті 10 м над поверхнею землі, зі швидкістю 5 м/с. З якою швидкістю та під яким кутом м'яч упаде на землю?

Відповідь: $v = 15$ м/с, $\alpha = 20^\circ$.

8. Снаряд, що був випущений із гармати під кутом $\alpha = 30^\circ$ до горизонту, два рази був на одній і тій же висоті h через проміжок часу $t_1 = 10$ с і $t_2 = 50$ с після пострілу. Визначити початкову швидкість v_0 і висоту h .

Відповідь: $v_0 = 588$ м/с, $h = 2,45$ км.

9. Тіло кинули з початковою швидкістю v_0 під кутом α до горизонту. Знайти модуль і напрямок швидкості тіла в точці його падіння.

Відповідь: v_0, α .

1.2 Динаміка

1.2.1 Основи динаміки. Закони Ньютона

Розділ фізики, який вивчає закони механічного руху тіл та причини, що викликають цей рух, називається *динамікою*. Взаємодію тіл (або їх частинок), дію поля на тіло характеризує сила. Сила – це векторна величина, яка є мірою взаємодії тіла з іншим тілом або полем. Наслідком взаємодії тіл (дії сили на тіло) є зміна стану руху тіла або зміна його розмірів (деформація).

Сила – це величина векторна, напрям якої збігається з напрямом спричиненого прискорення. Одиницею сили в СІ є Ньютон $N = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}$

Вимірюють силу динамометром. В механіці розглядаються сили пружності, сили тертя та гравітаційні сили.

Основними законами класичної механіки – є закони Ньютона.

Перший закон Ньютона

Існують такі системи відліку (інерціальні системи), відносно яких тіла, що рухаються поступально, зберігають свою швидкість сталою, коли на них не діють інші тіла або їхня дія компенсується.

Даний закон називають *законом інерції*. Систему відліку, відносно якої тіло в разі компенсації зовнішніх дій рухається рівномірно і прямолінійно, називають *інерціальною*. Усі системи відліку, що рухаються рівномірно і прямолінійно відносно неї, також будуть інерціальними.

Системи відліку, які рухаються відносно інерціальної системи відліку з прискоренням, будуть називатися неінерціальними. Усі інерціальні системи відліку рівноправні, тобто всі фізичні явища, всі механічні процеси за однакових умов відбуваються однаково. У класичній механіці справджується механічний принцип відносності Галілея: у всіх інерціальних системах відліку закони механіки однакові.

Як наслідок з перетворень Галілея є закон додавання швидкостей в інерціальних системах відліку:

$$\vec{v}_a = \vec{v}_b + \vec{v}_n.$$

Швидкість тіла у нерухомій системі відліку \vec{v}_a дорівнює векторній сумі швидкостей тіла відносно рухомої системи \vec{v}_b та швидкості рухомої системи відносно нерухомої \vec{v}_n .

Явище збереження тілом швидкості руху (стан спокою) в разі компенсації зовнішніх дій на тіло називається *інерцією*.

Властивість тіл, яка полягає в тому, що для зміни їх швидкості на певну величину потрібно, щоб дія на них інших тіл тривала певний час, називають *інертністю*. Маса тіла – це фізична величина, яка є кількісною мірою інертності тіл або їх гравітаційних властивостей. Маса – скалярна величина. Вимірюється маса в СІ – кілограмах [m] = кг. За міжнародною угодою за одиницю маси прийнято масу еталона – спеціально виготовленого циліндра із сплаву платини та іридію. Величину, що вимірюється відношенням маси тіла m до його об'єму V , називають *густиною*.

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

Одиницею густини в СІ є $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Прилад для вимірювання густини рідини називається *ареометром*.

Другий закон Ньютона встановлює кількісний зв'язок між силою, масою і прискоренням. Сила – це результат дії одного тіла на інше. Одиницею вимірювання сили є Ньютон (Н).

Другий закон Ньютона

Сила, що діє на тіло, дорівнює добутку маси цього тіла m на прискорення, якого надає ця сила.

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

На тіло одночасно можуть діяти декілька сил. Сила, що дорівнює геометричній сумі всіх прикладених до тіла сил, називається *рівнодійною* або *результуючою* силою. Отже, прискорення, якого набуває тіло, прямо пропорційне рівнодійній сил, що діють на тіло, і обернено пропорційне його масі:

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

Третій закон Ньютона

Тіла взаємодіють одне з одним, з силами, які рівні між собою, за модулем, але направлені протилежно вздовж однієї прямої.

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$

Третій закон Ньютона показує, що внаслідок взаємодії тіл сили завжди виникають парами. Якщо на будь-яке тіло діє сила, то обов'язково є якесь інше тіло, на яке перше діє з такою самою за модулем силою, але протилежно напрямленою. Ці сили будуть прикладені до різних тіл. Якщо на тіло діє декілька сил, тоді результуюче прискорення буде дорівнювати векторній сумі прискорень, отриманих тілом від дії кожної із сил окремо.

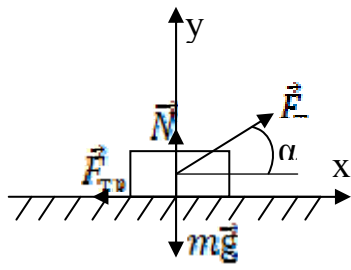
$$m\vec{a} = \vec{F} = m\vec{a}_1 + m\vec{a}_2 + \dots + m\vec{a}_n.$$

Приклади розв'язування задач

1. Яку силу слід прикласти, щоб рівномірно тягнути сани вагою в 50 кг, якщо мотузка утворює з горизонтом кут 30° , а коефіцієнт тертя полозів об сніг $\mu = 0,1$?

Розв'язання

Дано
 $m = 50$ кг,
 $\alpha = 30^\circ$
 $\mu = 0,1$
 $F_T = ?$



На сани діють такі сили: сила тяги F_T , напрямлена вздовж мотузки; сила тяжіння mg , напрямлена вертикально вниз; сила тертя F_{TP} , напрямлена в бік, протилежний руху; сила реакції опори \vec{N} .

Спроектуємо сили на координатні осі.

$$Ox: F_T \cos \alpha - F_{TP} = 0, F_{TP} = \mu N.$$

$$Oy: N - mg + F_T \sin \alpha = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow N = mg - F_T \sin \alpha.$$

Отже,

$$F_T \cos \alpha = \mu N \text{ або } F_T \cos \alpha = \mu(mg - F_T \sin \alpha),$$

$$F_T \cos \alpha + \mu F_T \sin \alpha = \mu mg,$$

$$F_T = \frac{\mu mg}{\cos \alpha + \mu \sin \alpha} = \frac{0,1 \cdot 50 \cdot 9,8}{\cos 30^\circ + 0,1 \cdot \sin 30^\circ} = 54 \text{ Н.}$$

Відповідь: $F_T = 54 \text{ Н.}$

2. Автомобіль масою 4 т рушає з місця і перші 200 метрів проходить за 10 с. Знайти силу тяги двигуна автомобіля, якщо коефіцієнт опору дорівнює $\mu = 0,1$.

Розв'язання

Дано
 $m = 4 \text{ т} = 4000 \text{ кг}$
 $\mu = 0,1$
 $S = 200 \text{ м}$
 $F = ?$

На автомобіль діють сили: тяжіння $F = mg$, сила реакції опори \vec{N} , сила тертя $\vec{F}_{\text{тр}} = \mu \vec{N}$, сила тяги двигуна. Під дією цих сил автомобіль рухається з прискоренням a . Запишемо другий закон Ньютона у векторній формі:

$$\vec{F} + \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{N} + m\vec{g} = m\vec{a}.$$

Спроектуємо на координатні осі:

$$Ox: F - F_{\text{тр}} = ma \Rightarrow F = ma + F_{\text{тр}},$$

$$Oy: N - mg = 0 \Rightarrow N = mg.$$

Оскільки $F_{\text{тр}} \neq \mu N = \mu mg$, тоді $F = m(a + \mu g)$.

Рух рівноприскорений, і початкова швидкість рівна нулю ($v_0 = 0$), то

$$S = \frac{at^2}{2} \Rightarrow a = \frac{2S}{t^2}, \text{ отже, } F = m \left(\frac{2S}{t^2} + \mu g \right).$$

Зробивши обчислення, отримаємо:

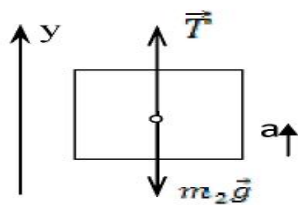
$$F = 4000 \left(\frac{2 \cdot 200}{10^2} + 0,1 \cdot 9,8 \right) = 19920 \text{ Н.}$$

Відповідь: $F = 19,920 \text{ кН.}$

3. Сталевий дріт витримує вантаж з масою до 450 кг. З яким найбільшим прискоренням можна піднімати вантаж масою 400 кг, що підвішений на цьому дроті, щоб він не обірвався?

Розв'язання

Дано
 $m_1 = 450 \text{ кг}$
 $m_2 = 400 \text{ кг}$
 $a = ?$



$$T - m_2 g = m_2 a;$$

$$a = \frac{T - m_2 g}{m_2}.$$

T - сила натягу дроту

$$T = m_1 g.$$

$$T = 450 \cdot 9,8 = 4410 \text{ кг.}$$

Згідно з умовою задачі:

$$T \ll T_{\text{max}},$$

$$a = \frac{4410 - 400 \cdot 9,8}{400} = 1,22 \text{ м/с}^2.$$

Відповідь: $a = 1,22 \text{ м/с}^2$.

Задачі для самостійного розв'язування

1. Потяг, маса якого 500 т, після припинення дії тяги зупиняється під дією сили тертя $F_{\text{тр}} = 10^5 \text{ Н}$ через одну хвилину. З якою швидкістю рухався потяг?

Відповідь: $\mathcal{V} = 43 \text{ км/год}$.

2. Двоє тіл, маси яких 400 і 600 г, рухались назустріч одне одному і після удару зупинились. Яка швидкість другого тіла, якщо перше тіло рухалося з швидкістю 3 м/с.

Відповідь: 2 м/с.

3. Вагон, маса якого 60 т, під'їжджає зі швидкістю 0,2 м/с до нерухомої платформи і ударяє в неї буферами, внаслідок чого платформа набуває швидкості 0,4 м/с. Яку масу має платформа, якщо після удару швидкість вагона зменшилася до 0,1 м/с?

Відповідь: 15 т.

4. Трактор, сила тяги якого становить 15 кН, надає причепові прискорення $0,5 \text{ м/с}^2$. Якого прискорення надасть тому самому причепові трактор, що розвиває тягове зусилля 60 кН?

Відповідь: 2 м/с^2 .

5. На тіло масою 0,2 кг, яке перебуває в стані спокою, протягом 5 с діє сила 0,1 Н. Якої швидкості набуває тіло і який шлях воно пройде за цей час?

Відповідь: $\mathcal{V} = 2,5 \text{ м/с}$, $S = 6,25 \text{ м}$.

6. Під дією якоїсь сили візок, рухаючись із стану спокою, пройшов шлях 40 см. Коли на візок поклали вантаж 200 г, то під дією тієї ж самої сили і за той самий час візок пройшов із стану спокою шлях 20 см. Яка маса візка?

Відповідь: $m = 200 \text{ г}$.

7. Тіло масою $m = 3 \text{ кг}$ рівноприскорено опускається вертикально вниз із прискоренням $a = 2 \text{ м/с}^2$. Визначити силу натягу нитки, до якої прив'язаний вантаж.

Відповідь: 23,4 Н.

8. Який вантаж можна підняти рівноприскорено протягом 10 с силою $F = 1000 \text{ Н}$ на висоту 10 м? Яка буде сила натягу нитки, якщо ми цей вантаж будемо з таким же прискоренням опускати вниз?

Відповідь: $T_{\text{н}} = 979 \text{ Н}$.

1.2.2 Сили в природі

В механіці маємо справу лише з трьома видами сил: із силою тяжіння, силою пружності і силою тертя.

Сила гравітаційного притягання

Гравітаційна взаємодія властива всім тілам і частинкам. Сила гравітаційного притягання обчислюється за законом всесвітнього тяжіння:

тіла притягуються одне до одного із силою, яка прямо пропорційна добутку їх мас і обернено пропорційна квадрату відстані між ними (рис.7).

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}.$$

де G – гравітаційна стала. $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$,

Гравітаційна стала чисельно дорівнює силі тяжіння, що виникає між двома матеріальними точками, маса кожної з яких 1кг і які розміщені на відстані 1м одна від одної.

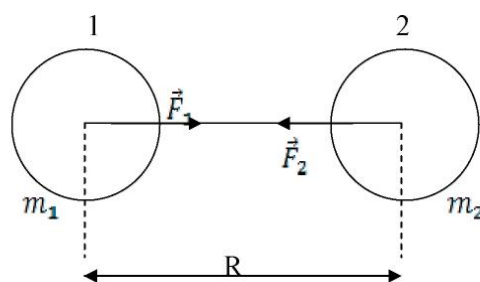


Рисунок 7

$$G = \frac{FR^2}{m_1 m_2}.$$

Числове значення гравітаційної сталої вперше було виміряне за допомогою чутливих крутильних терезів Г. Кавендішем. Навколо кожного тіла існує гравітаційне поле. Поле одного тіла діє на друге і навпаки. Напруженістю гравітаційного поля є величина, яка вимірюється відношенням сили тяжіння, що діє на дане тіло в даній точці гравітаційного поля, до маси.

$$g = \frac{F}{m} = G \frac{m}{R^2}.$$

Сила тяжіння – це сила, з якою Земля притягає тіла в результаті гравітаційної взаємодії.

$$F_{\text{тяж}} = G \frac{mM_3}{(R_3 + h)^2},$$

де M_3 - маса Землі,

m – маса тіла,

R_3 - радіус Землі,

h – висота над поверхнею Землі.

$$g_{\text{тяж}} = \frac{F_{\text{тяж}}}{m} = G \frac{M}{(R + h)^2},$$

де $g_{\text{тяж}}$ – прискорення вільного падіння, $g = 9,8 \text{ М/с}^2$. Прискорення вільного падіння залежить від географічного розташування.

Тіла поблизу поверхні Землі (крім полюсів) обертаються, тобто рухаються по колових траєкторіях (рис. 8).

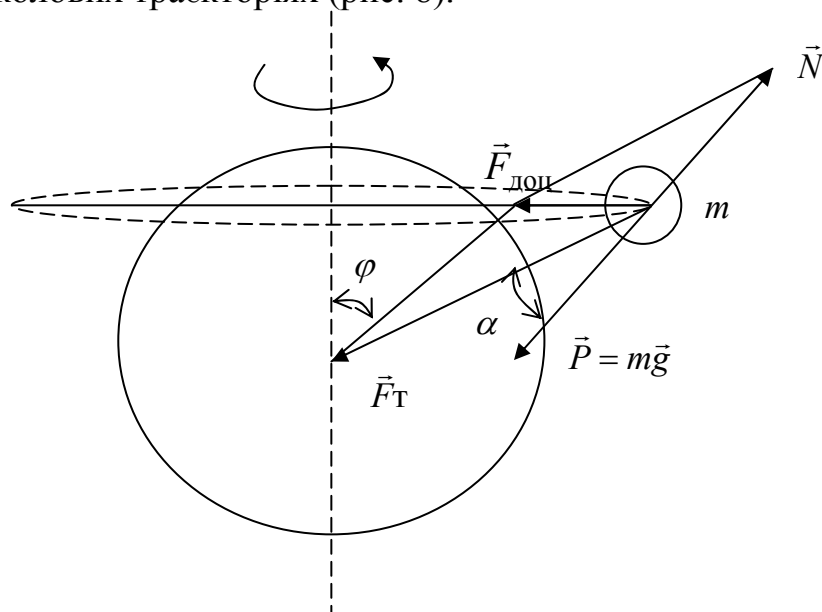


Рисунок 8

Тоді прискорення вільного падіння g - це прискорення тіла відносно Землі, що обертається.

$$\vec{g} = \vec{g}_{\text{тяж}} - \vec{a}.$$

де \vec{a} – доцентрове прискорення тіла.

На полюсах $\vec{a} = 0$, тому $\vec{g} = \vec{g}_{\text{тяж}}$, на екваторі $a = \omega^2 (R+h)$, тому $|\vec{g}| = |\vec{g}_{\text{тяж}}| - |\vec{a}|$, на середніх широтах $a = \omega^2 (r+h)$, r - радіус кола, по якому обертається тіло.

В інерціальних системах відліку, які пов'язані із Землею, вага тіла – це сила, з якою тіло діє на опору або на підвіс внаслідок притягання до Землі.

$$\vec{P} = m\vec{g}.$$

Невагомість – це стан, при якому тіло не зазнає дії сили реакції опори чи підвісу:

$$\vec{P} = m(\vec{g} - \vec{a}).$$

Якщо $a = g$, $P = 0$ - невагомість. Стан невагомісті настає тоді, коли тіло рухається тільки під дією сили всесвітнього тяжіння. Наприклад, політ космічного корабля з вимкненими двигунами. Якщо тіло (разом з опорою чи підвісом) рухається з прискоренням, напрямленим протилежно прискоренню вільного падіння, то його вага збільшується. Це називається перевантаженням.

$$\vec{P} = m(\vec{g} + \vec{a}).$$

Отже, вага тіла може бути більшою або меншою, або дорівнювати силі тяжіння.

Сила пружності

Сили, що виникають під час пружної деформації тіл, називають *силами пружності*. Вони напрямлені в бік, протилежний до напрямку зміщення частинок тіла в момент деформації. Силу пружності, з якою опора або підвіс діє на тіло, називають реакцією опори або підвісу. Закон Гука: сила пружності прямо пропорційна деформації і напрямлена у протилежний до зміщення частинок бік.

$$F_{\text{тр}} = -kx,$$

де x - деформація,

k – коефіцієнт жорсткості, він залежить від розмірів, форми, роду речовини. Одиниця вимірювання - $\frac{\text{Н}}{\text{м}}$. Деформації бувають розтягу, згину, кручення, стиску та зсуву.

Сила тертя

Дана сила виникає при взаємному переміщенні (ковзанні) тіл. Модуль сили тертя пропорційний модулю сили, з якою притискаються поверхні тіл, які труться, тобто модулю сили нормального тиску \vec{N} :

$$F_{\text{тр}} = \mu N,$$

де μ - коефіцієнт тертя, безрозмірна величина.

Сила тертя ковзання завжди направлена в бік, протилежний рухові тіла (рис. 9). Вона зумовлена пружною та пластичною деформацією мікронерівностей поверхонь, що лежать у площині дотику.

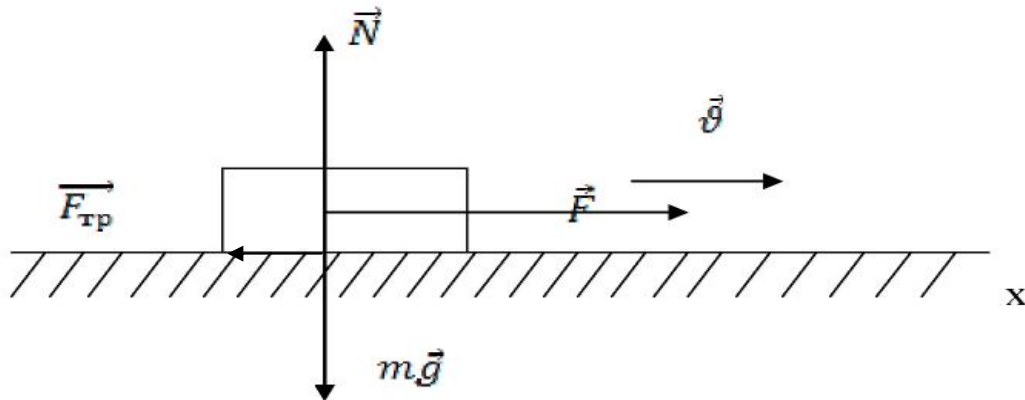


Рисунок 9

Якщо одне тіло котиться по поверхні іншого, виникає тертя кочення (рис. 10).

Сила тертя кочення визначається:

$$\vec{F}_{\text{тр.к}} = k \frac{\vec{N}}{R},$$

де k – коефіцієнт тертя кочення, який має розмірність довжини,

R - радіус поверхні тіла, що котиться.

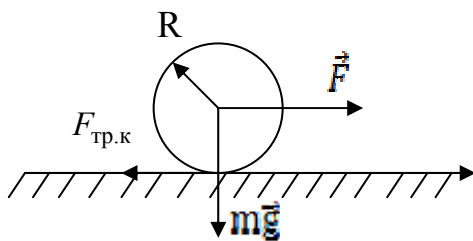


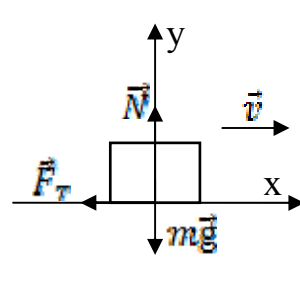
Рисунок 10

Приклади розв'язування задач

1. При швидкості 20 м/с водій вимикає двигун і починає гальмування по горизонтальній ділянці дороги з коефіцієнтом тертя 0,2. Визначити час, через який зупиниться автомобіль, його прискорення та гальмівний шлях.

Дано
 $v = 20$ м/с
 $\mu = 0,2$

$t = ?$; $a = ?$; $S = ?$



Розв'язання

Запишемо II закон Ньютона у векторній формі:

$$\vec{N} + m\vec{g} + \vec{F}_{\text{тр}} = m\vec{a}.$$

Спроектуємо на координатні осі:

$$Ox : F_{\text{тр}} = ma,$$

$$Oy : N - mg = 0 \Rightarrow N = mg.$$

Оскільки $F_{\text{тр}} = \mu N$, то $\mu mg = ma \Rightarrow a = \mu g$,

$$a = 0,2 \cdot 9,8 = 1,96 \text{ м/с}^2.$$

Для рівносповільненого руху $v = v_0 - at$, оскільки кінцева швидкість:

$$v = 0, \text{ то } at = v_0, \text{ а } t = \frac{v_0}{a} = \frac{20}{1,96} = 10,2 \text{ с.}$$

Пройдений шлях знайдемо з формули для рівносповільненого руху:

$$S = \frac{v_0^2 - v^2}{2a}, \quad v = 0,$$

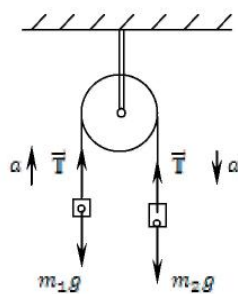
$$\text{то } S = \frac{v_0^2}{2a} = \frac{20^2}{2 \cdot 1,96} = 102 \text{ м.}$$

Відповідь: $a = 1,96 \text{ м/с}^2$, $t = 10,2 \text{ с}$, $S = 102 \text{ м}$.

2. Через нерухомий блок перекинута нитка, до якої підвішені вантажі масою $m_1 = 1$ кг і $m_2 = 2$ кг. Визначити прискорення вантажів і натяг ниток під час руху вантажів. Тертям в блоці і масою нитки знехтувати.

Дано
 $m_1 = 1$ кг
 $m_2 = 2$ кг

$a = ?$; $T = ?$



Розв'язання

Вантажі зв'язані один з одним натягнутою ниткою, тому їх прискорення буде однаковим. Запишемо другий закон Ньютона у проекції на вісь Oy для кожного тіла:

$$T - m_2g = -m_2a \Rightarrow T = m_2g - m_2a.$$

$$T - m_1g = m_1a \Rightarrow T = m_1a + m_1g.$$

Прирівнявши, отримаємо прискорення:

$$a = \frac{m_2g - m_1g}{m_2 + m_1} \approx 3,3 \text{ м/с}^2,$$

а сила натягу $T = 1(9,8 + 3,3) \approx 13,1$ Н.

Відповідь: $a \approx 3,3$ м/с², $T \approx 13,1$ Н.

3. На гладенькому столі лежить вантаж масою $m = 4$ кг. До вантажу прив'язали дві нитки, які перекинуті через нерухомі блоки, що розміщені на протилежних кінцях стола. До кінців підвішені вантажі, маси яких $m_1 = 1$ кг, $m_2 = 2$ кг. Знайти прискорення a , з яким рухається вантаж, і силу натягу кожної з ниток. Масою блоків і тертям знехтувати.

Розв'язання

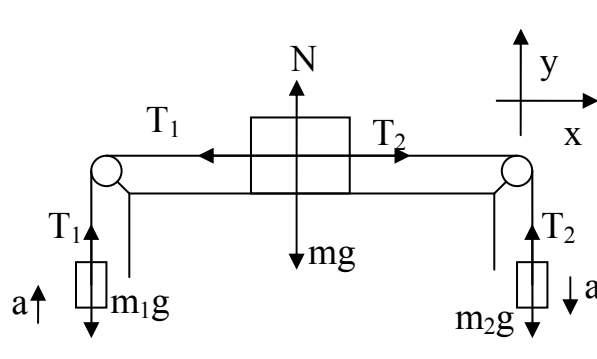
Дано

$m = 4$ кг

$m_1 = 1$ кг

$m_2 = 2$ кг

a -?; T_1 -?; T_2 -?



Запишемо II закон Ньютона для кожного тіла:

$$T_1 - m_1 g = m_1 a \Rightarrow T_1 = m_1 a + m_1 g, \quad (1)$$

$$T_2 - m_2 g = -m_2 a \Rightarrow T_2 = m_2 g - m_2 a, \quad (2)$$

$$T_2 - T_1 = ma. \quad (3)$$

Підставивши вираз (1) і (2) в (3), отримаємо:

$$m_2 g - m_2 a - m_1 a - m_1 g = ma,$$

$$a = \frac{(m_2 - m_1)g}{m_1 + m_2 + m_3} = \frac{(2 - 1)9,8}{4 + 1 + 2} = 1,4 \text{ м/с}^2,$$

$$T_1 = 1(1,4 + 9,8) = 11,2 \text{ Н},$$

$$T_2 = 2(9,8 - 1,4) = 16,8 \text{ Н}.$$

Відповідь: $a = 1,4$ м/с², $T_1 = 11,2$ Н, $T_2 = 16,8$ Н.

4. Похила площина, утворює кут $\alpha = 25^\circ$ з площиною горизонту і має довжину $l = 2$ м. Тіло, рухаючись рівноприскорено, скочає з цієї площини за час $t = 2$ с. Визначити коефіцієнт тертя тіла об площину.

Розв'язання

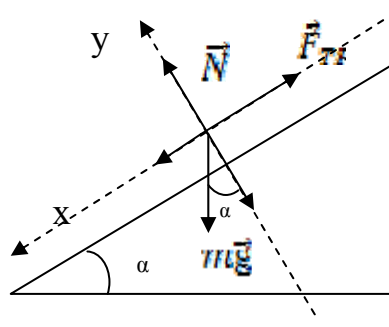
Дано

$\alpha = 25^\circ$

$l = 2$ м

$t = 2$ с

μ -?



Запишемо II закон Ньютона в проекціях на координатні осі:

$$Ox : ma = mg \sin \alpha - F_{\text{тр}},$$

$$Oy : N - mg \cos \alpha = 0,$$

$$Oy : N = mg \cos \alpha.$$

Врахувавши, що $F_{\text{тр}} = \mu N = \mu mg \cos \alpha$, отримаємо:

$$mg \sin \alpha - \mu mg \cos \alpha = ma \text{ або } g \sin \alpha - \mu g \cos \alpha = a; \mu = \frac{g \sin \alpha - a}{g \cos \alpha}; \text{ для}$$

$$\text{рівноприскореного руху } l = \frac{at^2}{2} \Rightarrow a = \frac{2l}{t^2} = \frac{2 \cdot 2}{2 \cdot 2} = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$\mu = \frac{9,8 \cdot \sin 25^\circ - 1}{9,8 \cdot \cos 25^\circ} = 0,35.$$

Відповідь: $\mu = 0,35$.

Задачі для самостійного розв'язування

1. Середня відстань між центрами Землі та Місяця дорівнює 60 земним радіусам, а маса Місяця у 81 раз менша від маси Землі. В якій точці на прямій, що з'єднує їхні центри, тіло буде притягуватися до Землі і до Місяця з однаковими силами?

Відповідь: $6R_{\text{З}}$ від центра Місяця.

2. Визначити видовження буксирного тросу, жорсткість якого 100 кН/м під час буксирування автомобіля масою 2 т з прискоренням $0,5 \text{ м/с}^2$. Тертя до уваги не брати.

Відповідь: $\Delta l = 1 \text{ см}$.

3. Куля рухається без тертя по похилій площині з кутом нахилу $\alpha = 30^\circ$. З яким прискоренням рухається куля?

Відповідь: $a = 4,9 \text{ м/с}^2$.

4. На борт корабля висотою 5 м за допомогою мотузки рівноприскорено піднімають відро з водою за 5 с. Маса відра з водою 10 кг. Визначити силу натягу мотузки.

Відповідь: $T = 102 \text{ Н}$.

5. На похилій площині завдовжки 5 м і заввишки 3 м лежить вантаж, маса якого 50 кг. Яку силу, напрямлену вздовж площини, треба прикласти, щоб утримати цей вантаж? Витягнути його рівномірно вгору? Витягнути з прискоренням 4 м/с^2 ? Коефіцієнт тертя становить $\mu = 0,2$.

Відповідь: 220 Н, 380 Н, 830 Н.

6. Ковзаняр рухається зі швидкістю 10 м/с по колу, радіус якого 30 м. Під яким кутом до горизонту він має нахилитися, щоб зберегти рівновагу?

Відповідь: 72° .

7. Автомобіль масою 9 т рухається з постійною швидкістю 20 м/с. З якою силою тисне автомобіль на середину:

а) горизонтального містка;

б) опуклого;

в) угнутого містка, якщо радіус кривизни містків $R=400 \text{ см}$?

Відповідь: $N_1 = 88,2 \cdot 10^3 \text{ Н}$, $N_2 = 81 \cdot 10^3 \text{ Н}$, $N_3 = 99 \cdot 10^3 \text{ Н}$.

8. Середня висота супутника над поверхнею Землі дорівнює радіусу Землі. Визначити швидкість супутника і період його обертання.

Відповідь: $v = 7,24 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, $T = 3 \text{ год}$.

1.2.3 Імпульс тіла. Закон збереження імпульсу

Імпульсом (кількістю руху) тіла називається векторна величина, що вимірюється добутком маси тіла на його швидкість.

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

Одиниця імпульсу в СІ – Ньютон – секунда $[p] = \text{кг} \cdot \text{м/с}$.

Величина $\vec{F} \cdot t$ має назву імпульса сили $[F \cdot t] = \text{Н} \cdot \text{с}$.

Систему тіл називають замкненою (ізолюваною), якщо на неї не діють зовнішні сили. Для замкненої системи геометрична сума імпульсів тіл є величиною сталою під час будь-яких рухів і взаємодії тіл системи.

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + \dots + m_n\vec{v}_n = m_1\vec{u}_1 + m_2\vec{u}_2 + \dots + m_n\vec{u}_n = \text{const},$$

де v_1, v_2, v_n – швидкість відповідних тіл до взаємодії,

u_1, u_2, u_n – швидкості цих тіл після взаємодії.

Рівняння виражає закон збереження імпульсу.

Пружною взаємодією тіл (пружним ударом) називається взаємодія, під час якої зберігається геометрична сума імпульсів та сума кінетичних енергій взаємодіючих тіл.

Непружною взаємодією (непружним ударом) називається взаємодія, після якої форма тіл не відновлюється і обидва тіла рухаються як одне. Застосувавши закон збереження імпульсу $m_1g_1 + m_2g_2 = (m_1 + m_2)u$, отримаємо:

$$u = \frac{m_1g_1 + m_2g_2}{m_1 + m_2}.$$

При непружному ударі тіла нагріваються за рахунок зменшення кінетичної енергії:

$$Q = \left(\frac{m_1g_1^2}{2} + \frac{m_2g_2^2}{2} \right) - \left(\frac{m_1 + m_2}{2} \right) u^2.$$

Закони збереження імпульсу можна продемонструвати на прикладі реактивного руху. Реактивний рух – це рух, який виникає, коли від тіла відокремлюється і рухається з деякою відносною швидкістю якась його частинка. Наприклад, коли із сопла ракети витікають продукти згорання палива. Під час цього ракета дістає такий самий за модулем імпульс, як імпульс продуктів згорання, але напрямком буде протилежний (рис. 11).

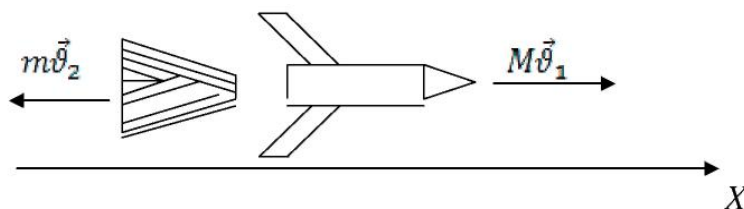


Рисунок 11

Виходячи із закону збереження імпульсу $0 = Mg_1 - mg_2$, швидкість ракети визначимо за формулою:

$$g_1 = \frac{m g_2}{M}$$

Реактивна сила тяги буде розраховуватися за формулою:

$$\vec{F} = -\mu \vec{g}$$

де g – швидкість витікання палива відносно ракети,

μ – витрата палива (зменшення маси) за одиницю часу.

Приклади розв'язування задач

1. Куля масою 10 г вилітає з дула гвинтівки зі швидкістю 800 м/с і через 2 с її швидкість стає рівною 300 м/с. Визначити середню величину сили, що затримує політ кулі.

Розв'язання

Дано	Силу опору можна знайти, виходячи із II закону Ньютона: $Ft = m g_2 - m g_1$, де Ft є імпульс сили, $m g_2 - m g_1$ – зміна імпульсу тіла.
$g_1 = 300$ м/с	
$g_2 = 800$ м/с	
$t = 2$ с	
$F = ?$	

$$\text{Тоді } F = \frac{m g_2 - m g_1}{t} = \frac{m(g_2 - g_1)}{t},$$

$$F = \frac{0,01(800 - 300)}{2} = 2,5 \text{ Н.}$$

Відповідь: 2,5 Н.

2. Снаряд масою 25 кг, що летів горизонтально зі швидкістю 400 м/с, попадає у візок з піском масою 1875 кг і застрягає в піску. З якою швидкістю буде рухатися візок, якщо до попадання снаряду він рухався зі швидкістю 2 м/с в напрямку руху снаряда? З якою швидкістю буде рухатися візок, якщо снаряд летів би проти руху візка?

Розв'язання

Дано	До попадання снаряда в пісок снаряд мав імпульс $m_1 g_1$, а візок - $m_2 g_2$. Тоді загальний імпульс їх був рівний $m_1 g_1 + m_2 g_2$. Після того, як снаряд попав у візок з піском і застряг там, їх сумарний імпульс стане рівним: $(m_1 + m_2) g'$. Виходячи із закону збереження імпульсу: $m_1 g_1 + m_2 g_2 = (m_1 + m_2) g'$,
$m_1 = 25$ кг	
$m_2 = 1875$ кг	
$g_1 = 400$ м/с	
$g_2 = 2$ м/с	
$g = ?$	
$g' = ?$	

$$g = \frac{m_1 g_1 + m_2 g_2}{m_1 + m_2} = \frac{25 \cdot 400 + 1875 \cdot 2}{1900} = 7,2 \text{ м/с.}$$

Якщо снаряд летів би проти руху візка, то отримаємо:

$$m_1 g_1 - m_2 g_2 = (m_1 + m_2) g',$$

$$g' = \frac{m_1 g_1 - m_2 g_2}{m_1 + m_2} = \frac{25 \cdot 400 - 1875 \cdot 2}{1900} = 3,3 \text{ м/с.}$$

Відповідь: $g = 7,2 \text{ м/с}$, $g' = 3,3 \text{ м/с}$.

3. Човен масою 120 кг знаходиться в нерухомій воді. Рибалка, маса якого 80 кг, знаходиться в човні і переходить з одного кінця човна на інший. Яка довжина човна, якщо він при русі перемістився відносно поверхні води на 1 м? Опором води знехтувати.

Розв'язання

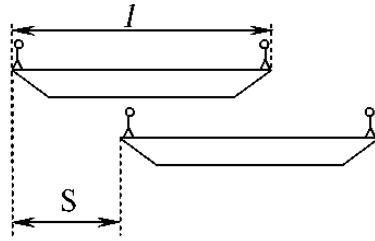
Дано

$$m_1 = 80 \text{ кг}$$

$$m_2 = 120 \text{ кг}$$

$$S = 1 \text{ м}$$

$l = ?$



Якщо довжина човна l , а переміщення його назад S , то швидкість людини відносно поверхні води буде

$$g_1 = \frac{l - S}{t}.$$

Швидкість переміщення човна відносно води - $g_2 = \frac{S}{t}$.

Використавши закон збереження імпульсу $m_1 g_1 = m_2 g_2$ або $\frac{m_1(l - S)}{t} = \frac{m_2 S}{t}$, отримаємо: $l = \frac{(m_1 + m_2)S}{m_1} = \frac{(80 + 120)1}{80} = 2,5 \text{ м.}$

Відповідь: $l = 2,5 \text{ м.}$

Задачі для самостійного розв'язування

1. Кулька масою 100 г вільно упала на горизонтальний майданчик, маючи в момент удару швидкість 10 м/с. Визначити зміну імпульсу в разі абсолютно непружного і абсолютно пружного ударів?

Відповідь: 1 кг м/с; 48 кг м/с.

2. На судні масою 750 т зроблено постріл у напрямі, протилежному руху судна, під кутом 30° до горизонту. На скільки змінилася швидкість судна, якщо снаряд масою 30 кг вилетів із швидкістю 1 км/с відносно судна?

Відповідь: $\Delta g = 0,2 \text{ м/с}$.

3. З човна масою 200 кг, який рухається із швидкістю 1 м/с, стрибає хлопчик, що має масу 50 кг, у горизонтальному напрямі зі швидкістю 7 м/с. Яка швидкість човна після стрибка хлопчика з корми в бік, протилежний рухові човна? З носа за ходом руху?

Відповідь: 3 м/с; 0,5 м/с.

4. Матеріальна точка масою $m = 1 \text{ кг}$, що рухається рівномірно, описує одну четверту кола радіусом $R = 1,2 \text{ м}$ протягом часу $t = 2 \text{ с}$. Знайти зміну імпульсу точки.

Відповідь: $\Delta p = 1,33 \text{ кг/с}$.

5. Снаряд масою $m = 10$ кг має швидкість $\mathcal{G} = 200$ м/с у верхній точці траєкторії. В цій точці він розірвався. Менша частина масою $m_1 = 3$ кг отримала швидкість $u_1 = 400$ м/с в попередньому напрямку. Яка швидкість більшої частини?

Відповідь: $u_2 = 114$ м/с.

6. Дві краплини ртуті, маса яких $m_1 = 1$ г $m_2 = 3$ г, рухаються зі швидкостями $\mathcal{G}_1 = 2$ м/с, $\mathcal{G}_2 = 6$ м/с, напрямленими під прямим кутом одна до одної. У деякій точці краплини зливаються і рухаються у вигляді однієї краплини. Визначити швидкість після злиття краплин.

Відповідь: 4,52 м/с.

7. Молекула масою $5 \cdot 10^{-26}$ кг летить зі швидкістю 500 м/с і пружно вдаряється у стінку під кутом 45° до неї. Знайти імпульс сили при ударі.

Відповідь: $3,5 \cdot 10^{-23}$ Н·с.

1.2.4 Робота, потужність, енергія. Закон збереження енергії

Робота в механіці характеризує дію сили і пов'язана з переміщенням (рис.12).

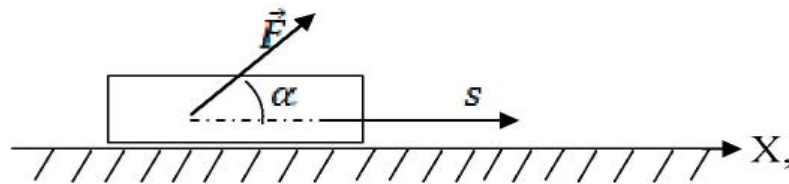


Рисунок 12

$$A = FScos\alpha,$$

де α – це кут між напрямком дії сили і переміщенням.

Робота – скалярна величина, вона може бути як додатною, так і від'ємною. Якщо напрям дії сили збігається з вектором переміщення, то робота сили над тілом вважається додатною, ($A > 0, \alpha < 90^\circ$). Якщо напрям дії сили і напрям переміщення протилежні, то робота буде від'ємною ($A < 0, \alpha > 90^\circ$) ($A < 0, \alpha > 90^\circ$). Одиниця роботи в СІ – Джоуль: $A - [Дж]$.

$$1 Дж = 1 Н \cdot м = \frac{1 кг \cdot м^2}{с^2}.$$

Потужність – це фізична величина, яка дорівнює виконаній роботі за інтервал часу. Потужність – це є швидкість виконання роботи.

$$P = \frac{A}{t}.$$

Потужність - величина скалярна і в СІ вимірюється у ватах:

$$1\text{Вт} = \frac{1\text{Дж}}{1\text{с}}.$$

Під час дії на тіло сили F , якщо воно рухається зі швидкістю ϑ , то потужність даної сили:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{FS \cos \alpha}{t} = F\vartheta \cos \alpha.$$

Механічна енергія – це фізична величина, яка характеризує механічний стан тіла і є загальною мірою різних видів механічного руху і різних взаємодій. Кінетична енергія характеризує рухоме тіло і пов'язана зі швидкістю тіла:

$$E_k = \frac{m\vartheta^2}{2}.$$

Потенціальна енергія характеризує взаємодію тіл або його частин і визначається їхнім взаємним розташуванням (рис.13).

Потенціальна енергія тіла при переміщенні у полі тяжіння.

$$E_{\text{П}} = mg(h_1 - h_2) = mg\Delta h.$$

Робота сили тяжіння не залежить від форми траєкторії, а буде визначатися тільки різницею потенціальних енергій тіла у початковому і кінцевих положеннях.

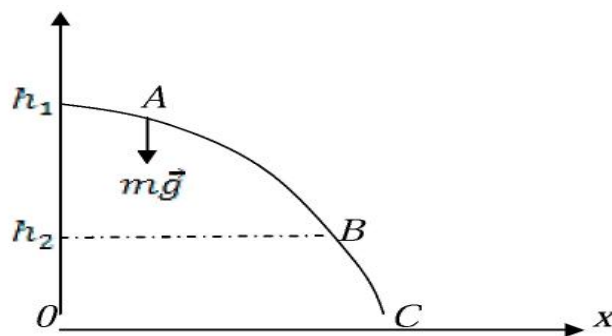


Рисунок 13

Потенціальна енергія пружно деформованого тіла обчислюється за формулою:

$$E_{\text{П}} = \frac{kx^2}{2},$$

де k - коефіцієнт пружності тіла.

Потенціальна енергія тіла масою m в полі тяжіння тіла масою M обчислюється за формулою:

$$E_{\text{П}} = -G \frac{Mm}{r},$$

де r – відстань між матеріальними точками.

Робота рівнодійної сил, що прикладені до тіла, дорівнює зміні його кінетичної енергії (теорема про кінетичну енергію):

$$A = \frac{m\vartheta_2^2}{2} - \frac{m\vartheta_1^2}{2}.$$

Пружно деформоване тіло при зміні деформації від x_1 до x_2 буде виконувати роботу:

$$A = \frac{k}{2}(x_2^2 - x_1^2).$$

Під час переміщення матеріальної точки масою m відносно іншої точки M сили тяжіння виконують роботу:

$$A = GmM \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right).$$

Повна механічна енергія замкненої системи, у якій діють тільки внутрішні сили, залишається, сталою:

$$E_{к1} + E_{n1} = E_{к2} + E_{n2},$$

$$\frac{m g_1^2}{2} + mgh_1 + \frac{kx_1^2}{2} = \frac{m g_2^2}{2} + mgh_2 + \frac{kx_2^2}{2}.$$

Дане рівняння виражає закон збереження повної механічної енергії.

Якщо в системі діють непотенціальні сили (наприклад сила тертя), то механічна енергія може перетворюватися у внутрішню.

Приклади розв'язування задач

1. Яку роботу необхідно виконати, щоб підняти рівноприскорено вантаж вагою 30 Н на висоту 10 м протягом 5 с? Якої потужності двигун потрібно мати для такого піднімання, якщо коефіцієнт корисної дії двигуна становить 80 %?

Розв'язання

Дано
 $P = 30 \text{ Н}$
 $h = 10 \text{ м}$
 $t = 5 \text{ с}$
 $\eta = 80 \%$

Роботу можна визначити за формулою $A = F \cdot h$, де F – сила, що потрібна для піднімання вантажу. При рівноприскореному русі, виходячи із другого закону Ньютона, отримаємо

$$F - P = ma \Rightarrow F = P + ma.$$

$A=?; P=?$

Прискорення для рівноприскореного руху розраховується

за формулою $a = \frac{2h}{t^2}$. Отже, $A = \left(P + m \frac{2h}{t^2} \right) h = Ph \left(1 + \frac{2h}{gt^2} \right)$.

Виконавши розрахунки, отримаємо величину роботи:

$$A = 30 \cdot 10 \left(1 + \frac{2 \cdot 10}{9,8 \cdot 5^2} \right) = 301 \text{ Дж}.$$

Потужність двигуна: $P = \frac{A_з}{t} = \frac{A_к}{\mu \cdot t} = \frac{301}{0,8 \cdot 5} = 75,25 \text{ Вт}.$

Відповідь: $A = 301 \text{ Дж}$, $P = 75,25 \text{ Вт}$.

2. Баба копра, маса якої 250 кг, падає на палю масою 100 кг зі швидкістю 5 м/с. Визначити ККД удару баби копра по палі і корисно виконану енергію. Удар непружний.

Розв'язання

Дано	ККД $\eta = \frac{E_k}{E_3} \cdot 100\%$, де E_3 - механічна енергія баби копра перед ударом палі: $E_3 = \frac{m_1 g_1^2}{2}$.
$m_1 = 250$ кг	
$m_2 = 100$ кг	
$g = 5$ м/с	
$\eta = ?$; $E_k = ?$	

$$E_k = \frac{(m_1 + m_2)U^2}{2},$$

де g_1 - швидкість баби копра перед ударом,

U - загальна швидкість тіл після удару.

Виходячи зі закону збереження імпульсу для непружного удару в скалярній формі, отримаємо: $m_1 g_1 + m_2 g_2 = (m_1 + m_2) u$.

Перед ударом швидкість палі $g_2 = 0$, тоді

$$m_1 g_1 = (m_1 + m_2)U \Rightarrow U = \frac{m_1}{m_1 + m_2} g_1.$$

$$\text{Тоді } E_k = \frac{(m_1 + m_2)m_1^2 g_1^2}{2(m_1 + m_2)^2} \Rightarrow$$

$$\eta = \frac{2m_1^2 g_1^2}{2(m_1 + m_2)m_1 g_1^2} \cdot 100\% \Rightarrow \eta = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot 100\%;$$

$$E_k = \frac{250^2 \cdot 5^2}{2 \cdot (250 + 100)} = 1,730 \text{ кДж}; \quad \eta = \frac{250}{250 + 100} \cdot 100\% = 71\%.$$

Відповідь: $E_k = 1,730$ кДж; $\eta = 71\%$.

3. Дві кулі масами $m_1 = 2,5$ кг і $m_2 = 1,5$ кг рухаються назустріч одна одній із швидкостями $g_1 = 6$ м/с і $g_2 = 2$ м/с. Визначити:

а) швидкість куль після удару;

б) кінетичну енергію куль до і після удару;

в) частку кінетичної енергії кулі, яка перетворилася у внутрішню енергію. Удар вважати прямим і непружним.

Розв'язання

Дано	Виходячи із закону збереження імпульсу, отримаємо: $m_1 g_1 - m_2 g_2 = (m_1 + m_2)u$, $u = \frac{m_1 g_1 - m_2 g_2}{m_1 + m_2} = \frac{2,5 \cdot 6 - 1,5 \cdot 2}{2,5 + 1,5} = 3$ м/с. Напрямок швидкості першої кулі будемо вважати додатним, а напрям другої кулі будемо вважати від'ємним:
$m_1 = 2,5$ кг	
$m_2 = 1,5$ кг	
$g_1 = 6$ м/с	
$g_2 = 2$ м/с	
$u = ?$, $E_{k1} = ?$	
$E_{k2} = ?$; $\omega = ?$	

$$E_{k1} = \frac{m_1 g_1^2}{2} + \frac{m_2 g_2^2}{2} = \frac{2,5 \cdot 6^2}{2} + \frac{1,5 \cdot 2^2}{2} = 48 \text{ Дж},$$

$$E_{к2} = \frac{m_1 + m_2}{2} u^2 = \frac{(2,5 + 1,5) \cdot 3^2}{2} = 18 \text{ Дж.}$$

Частина кінетичної енергії, яка пішла на збільшення внутрішньої енергії: $\omega = \frac{E_{к1} - E_{к2}}{E_{к1}} = \frac{48 - 18}{48} = 0,62.$

Відповідь: $u = 3 \text{ м/с}; E_{к1} = 48 \text{ Дж}; E_{к2} = 18 \text{ Дж}; \omega = 0,62.$

Задачі для самостійного розв'язування

1. Автомобіль, маса якого 3 т, починає рухатися зі стану спокою по горизонтальній ділянці шляху з прискоренням 3 м/с^2 . Коефіцієнт опору руху 0,02. Визначити роботу, яка виконується за перші 10 с руху, середню потужність за цей інтервал часу, миттєву потужність у кінці 10-ї секунди.

Відповідь: $6,6 \cdot 10^5 \text{ Дж}; N_{\text{ср}} = 6,6 \cdot 10^4 \text{ Вт}; N = 13,2 \cdot 10^4 \text{ Вт.}$

2. Тіло масою 100 г, кинуте вертикально вниз з висоти 20 м зі швидкістю 10 м/с, упало на землю з швидкістю 20 м/с. Знайти роботу з подолання опору повітря.

Відповідь: $A = 4,6 \text{ Дж.}$

3. Бомба масою 250 кг падає з висоти 800 м. Чому дорівнює її потенціальна і кінетична енергія на висоті 100 м над поверхнею землі і в момент падіння на землю? Опором повітря нехтуємо.

Відповідь: $E_{\text{п}} = 245000 \text{ Дж}; E_{\text{к}} = 1715000 \text{ Дж}; E_{\text{п}} = 0, E_{\text{к}} = 1960000 \text{ Дж.}$

4. Куля радіусом R лежить на поверхні землі. З верхньої точки кулі зісковзує зі стану спокою тіло, розміри якого набагато менші від розмірів кулі. На якій висоті h над поверхнею землі тіло відокремиться від кулі?

Відповідь: $h = (5/3)R.$

5. Автоматичний пістолет має рухомий кожух, зв'язаний з корпусом пружиною, жорсткість якої $k = 4 \text{ кН/м}$. Маса кожуха $M = 400 \text{ г}$, маса кулі $m = 8 \text{ г}$. Під час пострілу кожух відскакує назад на відстань $x = 3 \text{ см}$. З якою мінімальною швидкістю має вилітати куля, щоб пістолет міг працювати?

Відповідь: $\mathcal{V} = 150 \text{ м/с.}$

6. У шкільному досліді з «мертвою петлею» кульку масою m відпустили з висоти $h = 3R$ (R - радіус петлі). З якою силою тисне кулька в нижній і верхній точках петлі?

Відповідь: $7mg, mg.$

7. Предмет, маса якого m , обертають на нитці у вертикальній площині. На скільки сила натягу нитки у нижній точці буде більшою, ніж у верхній?

Відповідь: $6mg.$

1.3 Елементи статики

Статика – це розділ механіки, в якому вивчається рівновага тіла, на яке діють сили. Сила, якою можна замінити дію декількох сил, називається рівнодійною. Рівнодійну силу знаходять як векторну суму окремих сил (складових), які діють на тіло. Векторну суму на практиці знаходять за правилом паралелограма або трикутника (рис. 14).

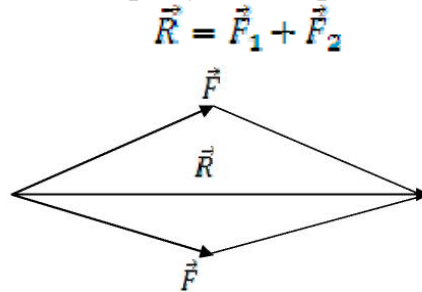


Рисунок 14

Тіло, яке не обертається, буде перебувати в рівновазі тоді, коли рівнодійна всіх сил, які прикладені до нього, дорівнює нулю:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0 \text{ або } \sum \vec{F}_i = 0.$$

У координатній формі алгебраїчна сума проекції сил, прикладених до тіла на довільну вісь, дорівнює нулю:

$$\begin{aligned} \vec{F}_{1x} + \vec{F}_{2x} + \dots + \vec{F}_{nx} &= 0, \\ \vec{F}_{1y} + \vec{F}_{2y} + \dots + \vec{F}_{ny} &= 0. \end{aligned}$$

Тіло, яке може обертатися навколо закріпленої осі, буде перебувати у рівновазі, якщо алгебраїчна сума моментів прикладених до нього сил відносно цієї осі дорівнює нулю:

$$M_1 + M_2 + \dots + M_n = 0, \sum M_i = 0.$$

Момент сили – вектор, який вимірюється добутком сили на плече.

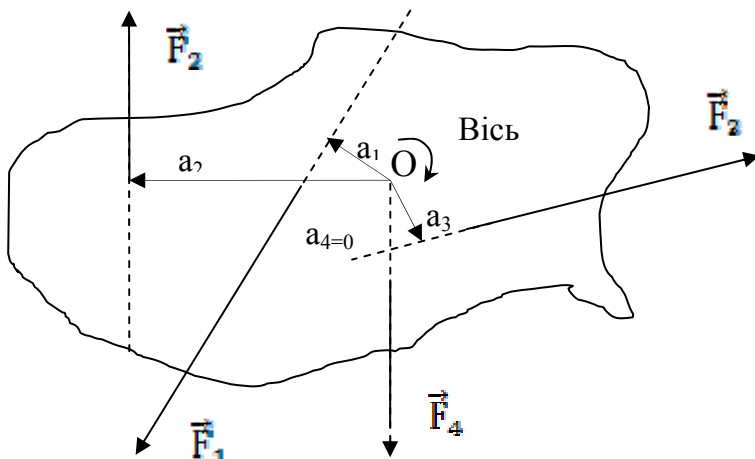


Рисунок 15

Напрямок моменту сили визначається за правилом свердлика.

В системі СІ за одиницю моменту сили прийнято момент сили в 1 Н, який має плече 1 м. $[M]=\text{Н}\cdot\text{м}$. Плечем сили називають найкоротшу відстань від осі обертання тіла до прямої, вздовж якої діє на нього сила (рис. 15).

Момент сили, який обертає тіло за годинниковою стрілкою, вважають додатним, а момент сили, який обертає тіло проти годинникової стрілки, – від'ємним. Центром ваги тіла називається точка прикладання сили

тяжіння, що діє на тіло. В однорідному полі сил тяжіння центр ваги і центр маси збігаються.

Розрізняють такі види рівноваги тіл: стійка, нестійка, байдужа.
 Стійка рівновага (рис.16);

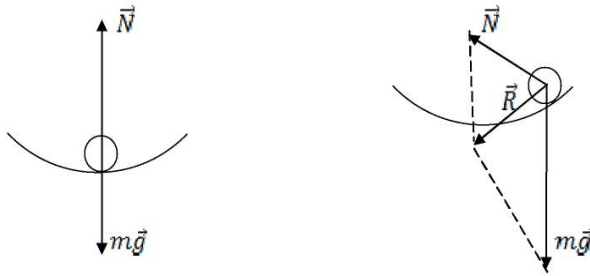


Рисунок 16

При малому відхиленні тіла від положення рівноваги, рівнодійна сил прикладених до тіла, повертає його в положення рівноваги.

Нестійка рівновага (рис.17);
 Байдужа рівновага (рис.18);

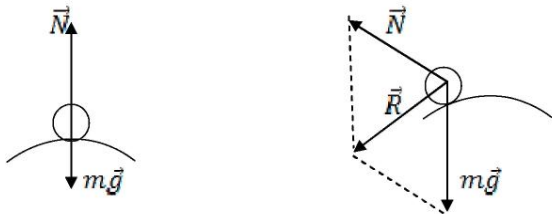


Рисунок 17

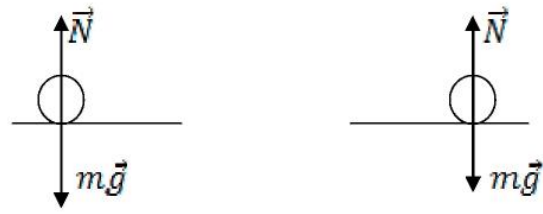


Рисунок 18

При будь-якому відхиленні тіло буде залишатися у рівновазі.

$$\vec{R} = m\vec{g} + \vec{N} = 0.$$

В положенні стійкої рівноваги центр тяжіння знаходиться на мінімальній висоті. В положенні стійкої рівноваги тіло має мінімальну потенціальну енергію.

Механічні пристрої, які використовуються для перетворення сили, називаються механізмами. До простих механізмів відносять важіль, похилу площину, клин, гвинт, блок, коловорот і т. д. В більшості випадків прості механізми застосовують для отримання вигоди у силі.

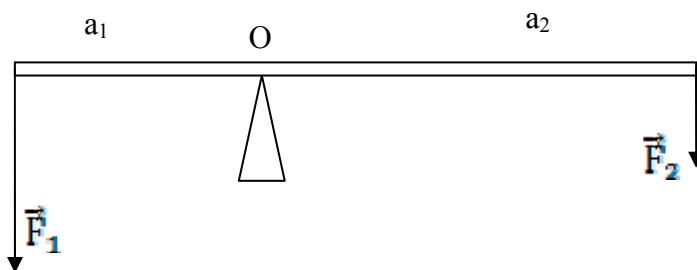
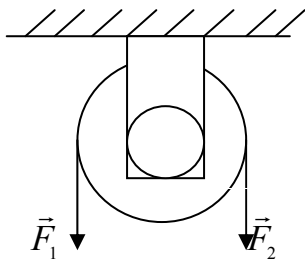


Рисунок. 19

Жоден із простих механізмів не дає вигоди в роботі. «Золоте правило механіки» - при використанні простих механізмів у скільки разів вигадаємо в силі, у стільки разів програємо у відстані. Важіль буде у рівновазі,

коли алгебраїчна сума моментів усіх сил, що діють на нього відносно осі обертання, дорівнює нулю (рис. 19).

Нерухомий блок (рис.20):

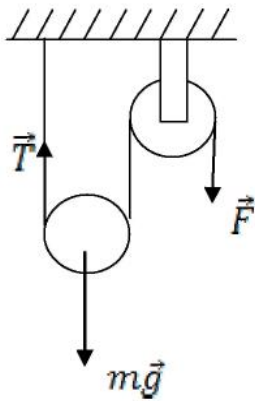


Нерухомий блок не дає виграшу в силі, а змінює лише напрям дії сили

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_2$$

Рисунок 20

Рухомий блок (рис.21):



Рухомий блок дає виграш у силі в два рази, але програє у переміщенні теж у два рази:

$$F = \frac{P}{2n}, \vec{F}_1$$

де n - число рухомих блоків.

Комбінація рухомого і нерухомого блоків, крім зміни напрямку дії сили, дає виграш у силі.

Рисунок 21

Приклади розв'язання задач

1. Визначити рівнодійну трьох сил, величина кожної з яких становить 200 Н, якщо кут між першою та другою і другою та третьою силами дорівнює 60° градусів.

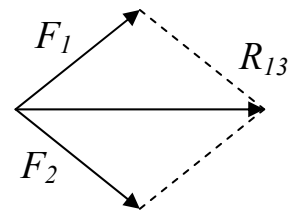
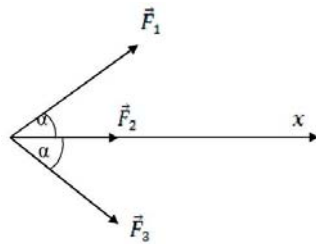
Дано

$$F = F_1 = F_2 = F_3 = 200 \text{ Н}$$

$$\alpha = 60^\circ$$

$R = ?$

Розв'язання



Рівнодійну сил F_1 і F_3 визначаємо за правилом паралелограма

$$\vec{R}_{13} = \vec{F}_1 + \vec{F}_3,$$

$$R_{13} = F_1 \cos \alpha + F_3 \cos \alpha = 2 F \cos \alpha = 2 \cdot 200 \cdot (1/2) = 200 \text{ Н.}$$

Рівнодійна трьох сил $\vec{R} = \vec{R}_{13} + \vec{F}_2$, $R = 200 + 200 = 400 \text{ Н.}$

Відповідь: $R = 400 \text{ Н.}$

2. До вертикальної гладенької стінки в точці A на мотузці завдовжки 1 м підвішено кулю масою 15 кг. Радіус кулі 18 см. Чому дорівнює сила натягу мотузки T і сила тиску кулі на стінку F ? Тертям знехтувати.

Розв'язання

Дано
 $l = 1 \text{ м}$
 $m = 15 \text{ кг}$
 $R = 18 \text{ см} =$
 $= 0,18 \text{ м}$
 $T = ?$ $F = ?$

Тіло буде в рівновазі, коли сума всіх сил, які діють на тіло, дорівнює нулю $\sum \vec{F}_i = 0$.

Сума моментів усіх сил, які діють на тіло відносно будь-якої нерухомої осі, також має дорівнювати нулю.

$$\sum M_i = 0.$$

На кулю діють такі сили: сила тяжіння $m\vec{g}$, сила реакції стінки \vec{N} (вона дорівнює силі тиску кулі на стінку \vec{F}), сила натягу мотузки. Як нерухому вісь візьмемо горизонтальну пряму, що паралельна стіні і проходить через центр кулі. Сили \vec{N} і $m\vec{g}$ направлені по радіусах кулі, тому їх моменти відносно вибраної осі дорівнюють нулю. Отже, і момент сили \vec{T} також має дорівнювати нулю. Запишемо тепер рівняння для проекцій сил на вертикальний і горизонтальний напрям:

$$Ox: -T \cos \alpha + N = 0 \quad \text{або} \quad N = T \cos \alpha,$$

$$Oy: T \sin \alpha - mg = 0 \quad \text{або} \quad T = \frac{mg}{\sin \alpha}.$$

Визначимо $\cos \alpha$ і $\sin \alpha$.

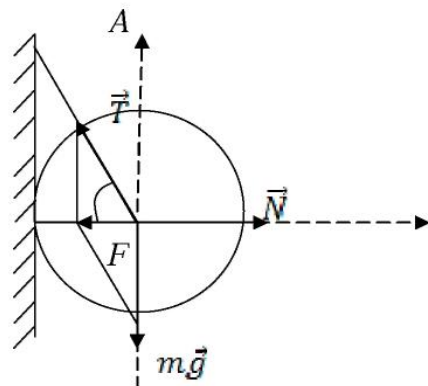
$$\sin \alpha = \frac{\sqrt{(l+R)^2 - R^2}}{l+R}, \quad \cos \alpha = \frac{R}{l+R}.$$

Тоді:

$$T = \frac{mg(l+R)}{\sqrt{(l+R)^2 - R^2}} = \frac{15 \cdot 9,8(1+0,18)}{\sqrt{(1+0,18)^2 - 0,18^2}} = 148,8 \text{ Н},$$

$$F = \frac{mgR}{\sqrt{(l+R)^2 - R^2}} = \frac{15 \cdot 9,8 \cdot 0,18}{\sqrt{(1+0,18)^2 - 0,18^2}} = 22,7 \text{ Н}.$$

Відповідь: $T = 148,8 \text{ Н}$, $F = 22,7 \text{ Н}$.

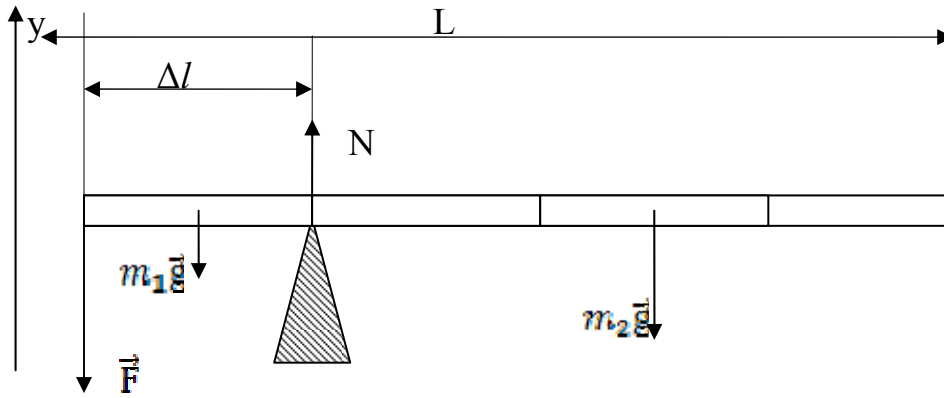


3. Дошка, маса якої 10 кг, підперта на відстані 1/4 її довжини. Яку силу перпендикулярно до дошки треба прикласти до її короткого кінця, щоб утримати дошку у рівновазі? Якою буде сила реакції опори, якщо прикласти цю силу?

Розв'язання

Дано
 $m = 10 \text{ кг}$
 $\Delta l = 1/4 l$
 $F = ?$ $N = ?$

Під дією прикладання сил дошка може обертатися навколо нерухомої осі O. Моменти сил, які обертають дошку за годинниковою стрілкою, вважають додатними: $F \Delta l < 0$, $m_1 g l_1 < 0$, $m_2 g l_2 > 0$.



Тоді величина прикладених сил:

$$F_1 = m_1 g = \frac{1}{4} mg = \frac{10 \cdot 9,8}{4} = 24,5 \text{ Н},$$

$$F_2 = m_2 g = \frac{3}{4} mg = \frac{3 \cdot 10 \cdot 9,8}{4} = 73,5 \text{ Н}.$$

Запишемо правило моментів:

$$-F\Delta l - F_1 l_1 + F_2 l_2 = 0 \Rightarrow \frac{F_2 l_2 - F_1 l_1}{\Delta l} = F.$$

Враховавши: $l_1 = \frac{\Delta l}{2} = \frac{l}{8}$, $l_2 = \frac{l - \Delta l}{2} = \frac{3}{8}l$.

Отже, $F = \frac{73,5 \cdot \frac{3}{8}l - 24,5 \cdot \frac{l}{8}}{\frac{l}{4}} = 98 \text{ Н}.$

Щоб знайти реакцію опори N , проектуємо усі сили, прикладені до дошки, на вісь Oy .

$$\text{Тоді } F + m_1 g = N + m_2 g,$$

$$N = F + m_1 g - m_2 g = 98 + 24,5 - 73,5 = 49 \text{ Н}.$$

Відповідь: $F = 98 \text{ Н}$, $N = 49 \text{ Н}$.

4. Ліхтар масою 3 кг підвішено до стержнів АВ і ВС. Визначити сили пружності, які діють на стержні АВ і ВС, якщо $\alpha = 60^\circ$.

Розв'язання

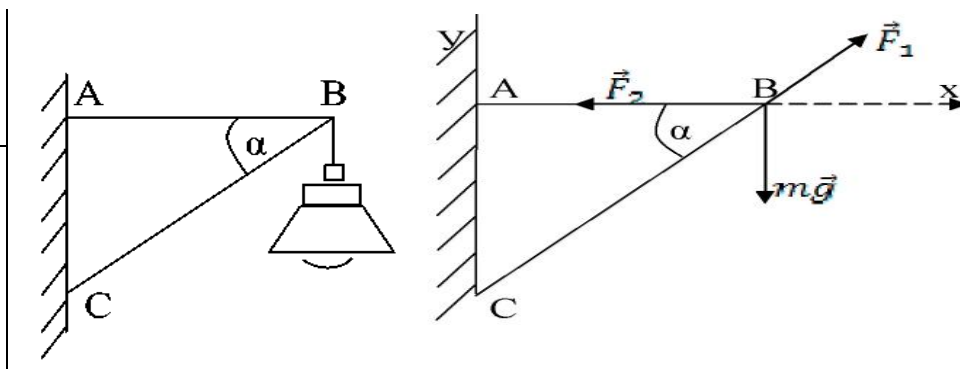
Дано

$$m = 3 \text{ кг}$$

$$\alpha = 60^\circ$$

$$F_1 - ?$$

$$F_2 - ?$$



У точці прикладання діють такі сили: сила пружності F_2 , яка розтягує стержень АВ, сила пружності F_1 , яка стискає стержень ВС, і сила тяжіння $\vec{F}_T = m\vec{g}$. Рівновага буде:

$$m\vec{g} + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0.$$

Спроектуємо на координатні осі.

$$Ox: F_1 \cos \alpha - F_2 = 0, F_2 = F_1 \cos \alpha,$$

$$Oy: F_1 \sin \alpha - mg = 0, F_1 = \frac{mg}{\sin \alpha}.$$

розрахуємо сили F_1 і F_2 .

$$F_1 = \frac{3 \cdot 9,8}{\sin 60^\circ} \approx 34 \text{ Н},$$

$$F_2 = 34 \cdot \cos 60^\circ = 17 \text{ Н}.$$

Відповідь: $F_1 \approx 34 \text{ Н}$, $F_2 = 17 \text{ Н}$.

Задачі для самостійного розв'язування

1. На парашутиста масою 90 кг на початку стрибка діє сила опору повітря, вертикальна складова якої дорівнює 500 Н, а горизонтальна -300 Н. Визначити рівнодійну всіх сил.

Відповідь: 500 Н.

2. На цвях, забитий у стіну перпендикулярно до неї, діє сила 200 Н під кутом 30° до стіни. Визначити складові цієї сили, з яких одна вириває цвях, а друга його згинає.

Відповідь: 0,1 кН. 0,17 кН.

3. Вантаж масою 50 кг підвішений до кронштейна, який складається з поперечної балки АВ і укосини ВС. Знайти сили, що діють на балку АВ і укосину ВС, якщо кут $ABC = 45^\circ$.

Відповідь: $F_1 = 343 \text{ Н}$, $F_2 = 240 \text{ Н}$.

4. Літак, рухаючись горизонтально прямолінійно, тягне за собою на тросах два планери. Кути між траєкторією літака і буксирними тросами однакові і дорівнюють 60° . Модуль сили натягу кожного троса дорівнює 3 кН. Модуль сили опору повітря, що діє на літак, дорівнює 1,5 кН. Якою має бути сила тяги двигуна літака, щоб під час руху літак і планери перебували в положенні статичної рівноваги?

Відповідь: $F_T = 4500 \text{ Н}$.

5. Рейку завдовжки 10 м, маса якої 900 кг, піднімають на двох паралельних тросах. Визначити силу натягу тросів, якщо один з них закріплено на кінці рейки, а другий – на відстані 1 м від другого кінця.

Відповідь: 4к Н, 5 кН.

6. Труба, маса якої 2,1 т, має довжину 16 м. Вона лежить на двох опорах, розташованих на відстані 4 і 2 м від її кінців. Яку мінімальну силу треба прикласти по черзі до кожного кінця труби, щоб підняти її за той чи інший кінець?

Відповідь: 7 кН, 9 кН.

7. Дерев'яний брусок лежить на похилій площині. З якою силою F , що направлена перпендикулярно до площини, потрібно притискати брусок, щоб він не ковзав? Маса бруска 2 кг, коефіцієнт тертя 0,4, кут нахилу площини до горизонту $\alpha = 60^\circ$.

Відповідь: 32 Н.

8. Два робітники несуть циліндричну сталеву трубу, маса якої 80 кг. Один робітник підтримує трубу на відстані 1 м від її кінця, а другий тримає за протилежний кінець труби. Визначити силу, з якою труба діє на робітників, якщо довжина її 5 м.

Відповідь: $F_1 = 440$ Н, $F_2 = 249$ Н.

9. До балки завдовжки 5 м, маса якої 200 кг, підвісили на відстані 3 м від одного з її кінців вантаж масою 250 кг. Своїми кінцями балка лежить на опорах. Обчислити силу тиску на кожну з опор.

Відповідь: 2,5 кН; 3 кН.

10. Металева балка масою 100 кг закріплена за допомогою троса. Один кінець балки впирається в кут між стіною і підлогою і залишається нерухомим. Кут нахилу балки до підлоги становить $\alpha = 60^\circ$, кут між балкою і тросом – прямий. Знайти силу натягу троса.

Відповідь: 435 Н.

2 МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

2.1 Молекулярна фізика

2.1.1 Основи молекулярно-кінетичної теорії (МКТ)

Розділ фізики, що вивчає залежність будови і фізичних властивостей тіл від характеру руху і взаємодії між частинками, з яких складаються тіла, називаються *молекулярною фізикою*. В основі теорії лежать три важливі положення, підтверджені експериментально і теоретично:

1) усі тіла складаються з найдрібніших частинок – атомів, молекул, до складу яких входять ще дрібніші елементарні частинки. Будова будь-якої речовини переривчаста;

2) атоми і молекули речовини завжди перебувають у безперервному хаотичному русі, який називається тепловим;

3) між частинками будь-якої речовини існують сили взаємодії – притягання і відштовхування.

Ці положення підтверджуються явищами дифузії, броунівського руху, особливостями будови і властивостями газів, рідин, твердих тіл та іншими явищами.

Основні поняття МКТ

Молекула – найменша стійка частинка речовини, яка зберігає її хімічні властивості.

Кількість речовини - характеристика фізичного тіла, яка пропорційна кількості молекул у тілі. Одиницею кількості речовини в СІ - моль (**v**).

Моль – кількість речовини, що містить стільки молекул (атомів), скільки атомів у 0,012 кг вуглецю.

Один моль будь-якої речовини містить однакову кількість атомів або молекул. Це число називається *числом Авогадро* (N_A).

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Відомо, що моль за нормальних умов має об'єм $V_0 = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Отже, в 1 м^3 будь-якого газу за нормальних умов міститься однакове число молекул:

$$N_n = \frac{N_A}{V_0} = \frac{6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}}{22,4 \cdot 10^{-3} \text{ моль} \cdot \text{м}^3} = 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

Це число називають *сталюю Лошмідта*. Маса окремого атома або молекули дуже мала, тому зручно користуватися відносними значеннями мас молекул (або атомів). Відносною молекулярною (або атомною) масою речовини M називають відношення маси молекули (або атома) m_0 даної речовини до однієї дванадцятої маси m_{0c} ізотопу ^{12}C атома *вуглецю*.

$$M_r = \frac{12m_0}{m_{0c}}.$$

Відносна молекулярна або атомна маса – безрозмірна величина.

Молярна маса M – маса 1 моля речовини. Вона дорівнює добутку маси молекули на сталу Авогадро.

$$M = N_A \cdot m_0,$$

де m_0 – маса молекули даного виду.

Маса будь-якої кількості речовини:

$$m = M \cdot \nu.$$

Кількість молекул у ν молях речовини можна визначити за формулою:

$$N = N_A \cdot \nu.$$

Доказом хаотичного руху молекул є спостережуваний під мікроскопом безладний безперервний рух нерозчинних у рідині малих крупинок твердої речовини, розмір яких має порядок 10^{-10} м. У 1827 р. англійський ботанік Р. Броун, спостерігаючи квітковий пилок під мікроскопом, виявив, що він рухається.

Дифузія – це явище проникнення молекул одного виду у проміжки між молекулами іншого виду (рис. 22).



Рисунок 22

Мікроскопічні властивості речовини, тобто її властивості при розмірах тіл, порівняних з розмірами молекул, мають статистичний характер. Це пояснюється хаотичністю руху молекул, скінченністю їх розмірів.

Приклади розв'язування задач

1. Визначити масу молекули водню.

Розв'язання

Дано

$$\mu = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

$m - ?$

Використовуючи поняття молярної маси, знаходимо: $M = m \cdot N_A \Rightarrow m = \frac{M}{N_A}$. Користуючись

таблицею Менделєєва, знайдемо молярну масу водню:

$$M_{H_2} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль.}$$

Підставивши числові значення, матимемо:

$$m = \frac{2 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}} = 3,35 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Відповідь: $m = 3,35 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$

2. В озеро, яке має середню глибину 10 м і площу поверхні 20 км², кинули кристалик кухонної солі масою 0,01 г. Скільки молекул цієї солі було у наперстку води об'ємом 2 см³, взятій з озера, якщо вважати, що сіль, розчинившись, рівномірно розподілилась у всьому об'ємі води?

Розв'язання

Дано

$$h = 10 \text{ м}$$

$$S = 20 \text{ км}^2 = 20 \cdot 10^6 \text{ м}^2$$

$$m = 0,01 \text{ г} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ кг}$$

$$V_H = 2 \text{ см}^3 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

$N_H - ?$

Знайдемо об'єм озера:

$$V_{Oz} = S \cdot h,$$

Кухонна сіль NaCl,

Молярна маса солі: $M_{NaCl} = 58,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль.}$

Складемо пропорцію: $\frac{N_H}{V_H} = \frac{N_{Oz}}{V_{Oz}},$

$$N_H = \frac{N_{Oz} \cdot V_H}{V_{Oz}} = \frac{N_{Oz} \cdot V_H}{S \cdot h}.$$

Кількість молекул солі в озері: $N_{оз} = N_A \cdot \frac{m}{M}$.

Отже,

$$N_H = N_A \cdot \frac{m}{M} \cdot \frac{V_H}{h \cdot S} = \frac{6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \cdot 10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{58,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} = 10^6 \text{ молекул.}$$

Відповідь: $N_H = 10^6$.

2. Для того щоб охарактеризувати забрудненість води нафтопродуктами, природоохоронні служби вказують характеристику забрудненості τ ($\text{м}^2/\text{м}^3$), яка дорівнює площі плівки, що може утворитися на поверхні з нафтопродуктів, які містяться у 1 м^3 забрудненої води. Визначити масу нафтопродуктів у 1 м^3 для $\tau = 0,6 \text{ м}^2/\text{м}^3$ та оцінити середнє значення молекулярної маси нафти, якщо середнє значення густини нафти – $0,8 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$, а товщина плівки становить $8 \cdot 10^{-10} \text{ м}$.

Розв'язання

Дано

$$V = 1 \text{ м}^3$$

$$\tau = 0,6 \text{ м}^2/\text{м}^3$$

$$d = 8 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$

$$\rho = 0,8 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$$

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

$$m - ? \text{ М} - ?$$

Утворення мономолекулярного шару (плівки) на поверхні води вказує на існування межі подільності речовини. Товщина плівки не може бути меншою за діаметр молекули. Якщо вважати, що площа поперечного перерізу молекули $S_0 = d^2$, то легко оцінити кількість молекул, які покривають площу S .

Об'єм нафтопродуктів у плямі: $V = S \cdot h$, а маса

$$m = \rho \cdot V = \rho d S = \rho d \tau V.$$

$$\text{Кількість молекул: } n = \frac{S}{d^2}.$$

$$\text{Кількість молів речовини: } \nu = \frac{n}{N_A} = \frac{S}{d^2 \cdot N_A}.$$

$$\text{Маса одного моля речовини: } M = \frac{m}{\nu}; \quad M = \rho \cdot d^3 \cdot N_A.$$

$$m = 0,8 \cdot 10^3 \cdot 8 \cdot 10^{-10} \cdot 0,6 = 3,84 \cdot 10^{-7} \text{ кг,}$$

$$M = 0,8 \cdot 10^3 \cdot (8 \cdot 10^{-10})^3 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 0,245 \text{ кг/моль.}$$

Відповідь: $m = 0,384 \text{ мг}$, $M = 0,245 \text{ кг/моль}$.

Задачі для самостійного розв'язування

1. Визначити кількість речовини і кількість молекул, що містяться в 1 кг вуглекислого газу.

Відповідь: $\nu = 22,7 \text{ моль}$, $N = 1,4 \cdot 10^{25}$.

2. На виріб, площа поверхні якого становить 20 см^2 , нанесли шар срібла завтовшки 1 мкм . Скільки атомів срібла міститься в покритті?

Відповідь: $N = 1,4 \cdot 10^{22}$.

3. Вважаючи, що діаметр молекул водню становить близько $2,3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, підрахувати, яку довжину мала б нитка, коли б усі молекули, що

містяться в 1 мг цього газу, розташувати в один ряд щільно одна до одної. Порівняти довжину цієї нитки із середньою відстанню від Землі до Місяця ($3,8 \cdot 10^5$ км).

Відповідь: $6,9 \cdot 10^{10}$ м, 180 разів.

4. Густина алмазу 3500 кг/м³. Який об'єм займуть 10^{22} атомів цієї речовини?

Відповідь: $V=5,7 \cdot 10^{-8}$ м³.

5. У скільки разів кількість атомів у 12 кг вуглецю перевищує кількість молекул в 16 кг кисню?

Відповідь: у 2 рази.

2.1.2 Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії. Середня квадратична швидкість молекул

Ідеальним називають газ, молекули якого – матеріальні точки, між якими відсутні сили взаємодії.

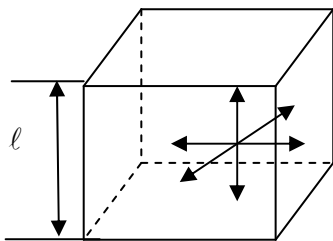


Рисунок 23

Тиск у посудині з газом зумовлений ударами молекул об стінки. При ударі на молекулу діє сила $f = \frac{\Delta(m\mathcal{G})}{\Delta t}$. За третім законом

Ньютона молекула діє на стінку з такою ж силою, але напрямлена протилежно.

Вважаючи, що за Δt падає на стінку N молекул, знайдемо повну силу (рис. 23):

$$F = -fN = - \frac{\Delta(m\mathcal{G})}{\Delta t} \cdot n_0 \cdot V, \quad (1)$$

де n_0 – число молекул в одиниці об'єму,

V - об'єм газу.

Рівність (1) можна переписати у вигляді

$$F = - n_0 S \cdot V (\Delta m \mathcal{G}),$$

де S - площа стінки.

При пружному зіткненні молекули зі стінкою її швидкість змінюється на протилежну:

$$\mathcal{G}_{\text{початк.}} = \mathcal{G}, \quad \mathcal{G}_{\text{кінц.}} = -\mathcal{G}, \quad \text{тоді } (\Delta m \mathcal{G}) = -2 m \mathcal{G}.$$

З урахуванням цього $F = 2 S n_0 m \mathcal{G}^2$, тиск газу

$$P = \frac{F}{S} = 2 n_0 m \mathcal{G}^2,$$

де \mathcal{G} - середня швидкість молекул.

В будь-якому напрямку буде рухатись $\frac{1}{3}$ всіх молекул (з граней куба), тоді

$$P = \frac{2}{3} n_0 \frac{m \mathcal{G}_{\text{сер}}}{2} \quad \text{або} \quad P = \frac{2}{3} n_0 W_{\text{кін}} - \text{рівняння Клаузіуса.} \quad (2)$$

Рівняння важливе тим, що воно пов'язує параметри макро- та мікросвіту.

Вводячи постійну Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, можна знайти вираз середньої кінетичної енергії поступального руху молекул через термодинамічну температуру:

$$T = W = \frac{3}{2} kT \text{ – рівняння Больцмана для енергії.} \quad (3)$$

Знайдемо $W_{\text{кінет.}}$ з рівняння (2): $W_{\text{кінет.}} = \frac{3P}{2n_0}$, підставимо в (3):

$$P = n_0 k T \text{ або } n_0 = \frac{P}{kT} \quad (4)$$

З формули (4) бачимо, що при однаковій температурі та тиску всі гази утримують в рівних об'єктах рівну кількість молекул – число Лошмідта.

N_l - молекул в 1 м^3 газу при нормальних умовах:

$$N_l = \frac{1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}}{1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} \cdot 273 \text{ К}} = 2,69 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

Середню квадратичну швидкість обчислюють:

$$g = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \text{ або } g = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}.$$

Приклади розв'язування задач

1. Який тиск на стінки посудини створював би ідеальний газ, концентрація молекул якого $1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, якщо їх середньоквадратична швидкість 1 км/с і маса молекули $3 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$?

Розв'язання

Дано $n_0 = 1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ $m = 3 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ $g_{\text{кв}} = 1 \cdot 10^3 \text{ м/с}$	Запишемо основне рівняння МКТ : $p = (1/3)n_0 m g_{\text{кв}}^2,$ $p = \frac{1}{3} \cdot 1 \cdot 10^{20} \cdot 3 \cdot 10^{-27} \cdot 1 \cdot 10^6 = 0,1 \text{ Па.}$
$p - ?$	

Відповідь: $p = 0,1 \text{ Па.}$

2. Визначити середню квадратичну швидкість молекул газу, густина якого при тиску $p = 50 \text{ кПа}$ становить $4,1 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$.

Розв'язання

Дано $p = 50 \cdot 10^3 \text{ Па}$ $\rho = 4,1 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$ $g_{\text{кв}} = ?$	Запишемо основне рівняння МКТ для тиску: $p = (1/3)n_0 m g_{\text{кв}}^2,$ де n_0 - число молекул в одиниці об'єму, m - маса молекули.
--	---

Добуток $n_0 m = \rho$ - густина газу.

Тоді $p = 1/3 \rho \cdot g^2$. Звідси $g_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 50 \cdot 10^3}{4,1 \cdot 10^{-2}}} = 1910 \text{ м/с}$.

Відповідь: 1910 м/с.

3. Густина газу в балоні газонаповненої електричної лампочки становить $\rho = 0,9 \text{ кг/м}^3$. Коли лампочка світиться, тиск газу в ній збільшиться з $p_1 = 8 \cdot 10^4 \text{ Па}$ до $p_2 = 1,1 \cdot 10^5 \text{ Па}$. На скільки збільшиться при цьому середня квадратична швидкість молекул газу?

Розв'язання

<p>Дано $p_1 = 8 \cdot 10^4 \text{ Па}$ $p_2 = 1,1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ $\rho = 0,9 \text{ кг/м}^3$ $\Delta g_{\text{кв}} = ?$</p>	<p>Враховавши, що $\rho - \text{тг}$, – густина газу. Основне рівняння МКТ має вигляд: $P = \frac{2}{3} n_0 W_{\text{кін}}$, тоді</p> $g_{\text{кв1}} = \sqrt{\frac{3p_1}{\rho}}, \quad g_{\text{кв2}} = \sqrt{\frac{3p_2}{\rho}},$
--	---

$$\Delta g_{\text{кв}} = g_{\text{кв2}} - g_{\text{кв1}} = \sqrt{\frac{3}{\rho}} (\sqrt{p_2} - \sqrt{p_1}), \quad \Delta g_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3}{0,9}} (\sqrt{1,1 \cdot 10^5} - \sqrt{8 \cdot 10^4}) =$$

$$= 90 \text{ м/с}.$$

Відповідь: 90 м/с.

Задачі для самостійного розв'язування

1. Як зміниться тиск газу, якщо концентрація його молекул збільшиться утричі, а середня швидкість молекул зменшиться утричі?

Відповідь: зменшиться в 3 рази.

2. Обчислити середню кінетичну енергію молекули одноатомного газу під тиском 20 кПа. Концентрація молекул цього газу під даним тиском становить $3 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$.

Відповідь: 10^{-21} Дж .

3. У скільки разів середня квадратична швидкість молекул кисню менша, ніж середня квадратична швидкість молекул водню, якщо температури цих газів однакові?

Відповідь: 4 рази.

4. Визначити середню кінетичну енергію молекули одноатомного газу і концентрацію молекул при температурі 290 К і під тиском 0,8 МПа.

Відповідь: $6 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$; $2 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$.

5. У скільки разів середня квадратична швидкість молекул повітря в літній день при температурі 30°C більша, ніж у зимовий день при температурі -30°C? Молярна маса повітря становить 0,029 кг/моль.

Відповідь: у 1,12 рази.

6. Визначити середню кінетичну енергію поступального руху молекули водню при температурі 27°C.

Відповідь: $51,1 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$.

2.1.3 Ідеальний газ. Рівняння стану. Ізопроееси. Закон Дальтона

Ідеальним називають такий газ, для якого можна знехтувати розмірами молекул та силами молекулярної взаємодії. Молекули в такому газі співударяються за законом співударяння пружних куль. Реальні гази поведуть себе як ідеальний тоді, коли середня відстань між молекулами у багато разів перевищує їхні розміри, тобто коли розрідження досить велике. Газ може бути в різних станах, тобто деяка маса газу має об'єм V , тиск p і температуру T . Величини V , p , T , що характеризують стан газу, називаються термодинамічними параметрами. Процеси, що відбуваються при сталому значенні одного з параметрів стану (T , V або p) з певною сталою масою газу, називаються *ізопроеесами*.

Ізотермічний процес - процес, що відбувається при сталій температурі ($T = \text{const}$). За законом Бойля-Маріотта, тиск даної маси газу при сталій температурі обернено пропорційний об'єму газу. Отже,

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1} \text{ або } p_1 V_1 = p_2 V_2 = \text{const}.$$

Криву залежності тиску газу від його об'єму при сталій температурі називають *ізотермою*.

Графік залежності між параметрами газу при $T = \text{const}$ (рис. 24).

Ізобаричний процес – процес, який відбувається при сталому тиску ($p = \text{const}$).

Виходячи із закону Гей-Люссака, відносна зміна об'єму даної маси газу в ізобарному процесі прямо пропорційна зміні температури t .

Отже, $\frac{V - V_0}{V} = \alpha t$ або $V = V_0(1 + \alpha t)$, або $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = \text{const}$,

де V_0 - об'єм газу при $t = 0^\circ\text{C}$,

V - його об'єм при температурі t ,

α – термічний коефіцієнт об'ємного розширення. Для всіх газів:

$$\alpha = \frac{1}{273} \text{ K}^{-1}.$$

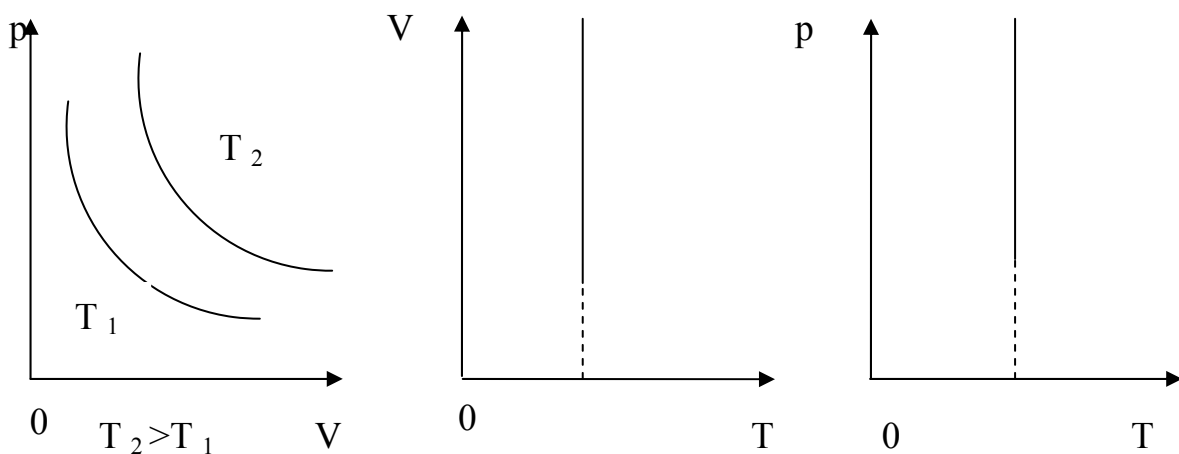


Рисунок 24

Криву залежності об'єму газу від температури при сталому тиску називають ізобарою.

Графік залежності між параметрами при $p = const$ (рис. 25).

Вищому тиску відповідає нижча ізобара. Штрихи означають, що закон Гей-Люссака в області низьких температур не застосовується. Об'єм не може перетворитися в нуль при температурі -273°C .

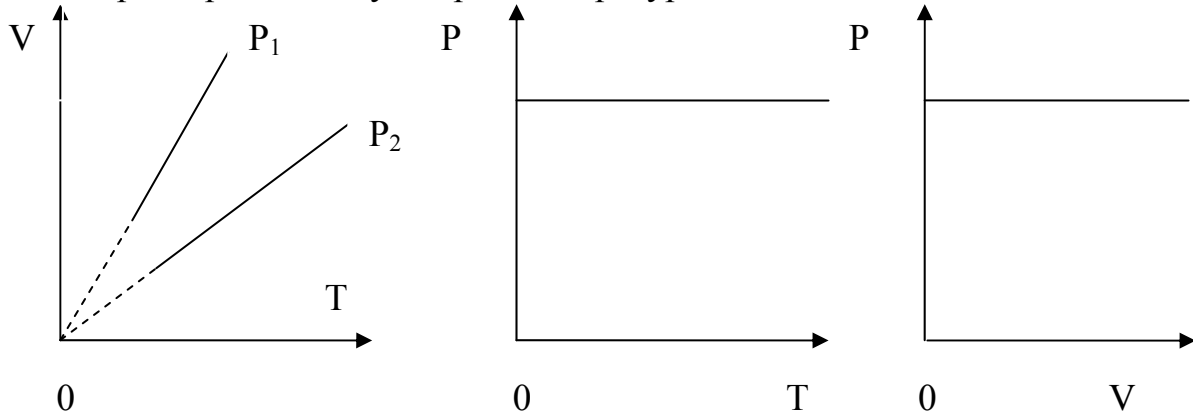


Рисунок 25

Ізохоричний процес – це процес, який відбувається при сталому об'ємі ($V = const$). Виходячи із закону Шарля, тиск даної маси газу при сталому об'ємі пропорційний його абсолютній температурі:

$$p = p_0 (1 + jt),$$

де p_0 - тиск при 0°C ,

j – термічний коефіцієнт тиску газу.

$$j = \frac{1}{273} \text{K}^{-1} \quad \text{або} \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} = const.$$

Залежність тиску газу від температури при сталому об'ємі графічно зображається прямою, яка називається *ізохорою*. Меншому об'ємі відповідає ізохора, що лежить вище.

Графік залежності між параметрами при сталому об'ємі $V = const$ (рис. 26).

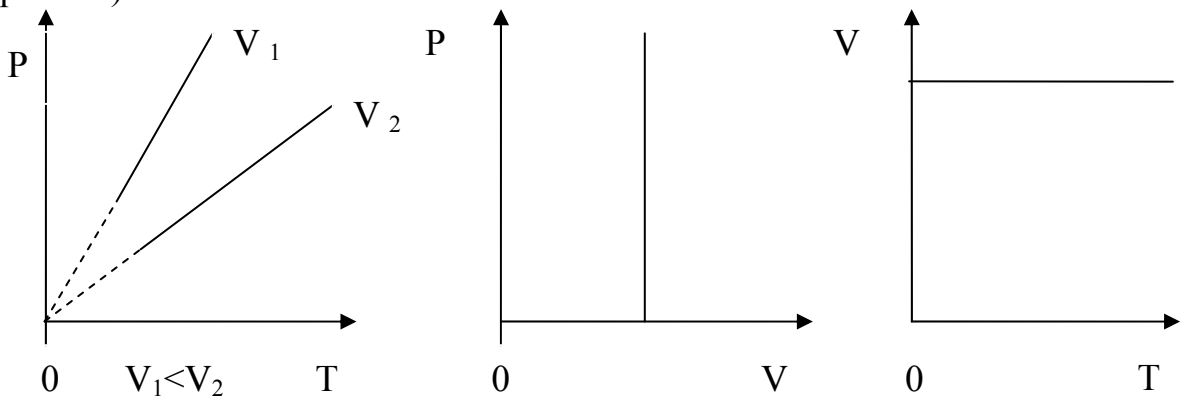


Рисунок 26

Виходячи із закону Шарля, можна знайти температуру, при якій тиск газу буде дорівнювати нулю.

$$p = p_0(1 + jt), \quad 0 = p_0(1 + jt).$$

Оскільки $p_0 \neq 0$, то $l + jt = 0$ або $t = -273^\circ\text{C}$.

Температуру $-273,16^\circ\text{C}$ називають абсолютним нулем температур.

Англійський вчений У.Томсон запропонував абсолютну шкалу температур. За абсолютний нуль було прийнято температуру $t = -273^\circ\text{C}$ (точніше $t_0 = -273,16^\circ\text{C}$). Абсолютна температура T пов'язана з температурою t за шкалою Цельсія таким співвідношенням:

$$T = t + 273^\circ\text{C}$$

В шкалі Цельсія за 0°C прийнято температуру танення льоду при нормальному тиску, за 100°C – температуру кипіння води при нормальному тиску.

В шкалі Кельвіна за 0 прийнято температуру, при наближенні до якої швидкість поступального руху молекул ідеального газу прямує до нуля, а 1 кельвін відповідає $1/100$ інтервалу температур між температурами танення льоду і кипіння води за нормального тиску.

За шкалою Фаренгейта:

$$t_F = 32 + \frac{t^\circ\text{C}}{5} \cdot 9.$$

Основна одиниця температури в СІ є кельвін – $[T] = \text{K}$.

Змінюючи всі три параметра p , V і T газу і користуючись газовими законами, можна отримати рівняння Клапейрона.

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \text{const.}$$

Добуток тиску даної маси газу на об'єм, поділений на абсолютну температуру, є величиною сталою.

При $t = 0^\circ\text{C}$, $p = 1,013 \cdot 10^5$ Па один моль будь-якого газу має об'єм $V_0 = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Підставивши ці дані в закон Клапейрона, отримуємо значення константи, яка є однаковою для будь-якого 1 моля газу. Її називають молярною універсальною газовою сталою.

$$R = \frac{p_0 V_0}{T} = \frac{1,013 \cdot 10^5 \cdot 22,4 \cdot 10^{-3}}{273} = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{K}}.$$

А для одного моля газу тепер можна записати:

$$p_0 V_0 = RT.$$

Цей вираз називають рівнянням Менделєєва – Клапейрона.

А для будь-якої маси газу рівняння Менделєєва – Клапейрона матиме вигляд:

$$pV = \frac{m}{M} RT.$$

Якщо в об'ємі V знаходиться суміш газів, які не реагують один з одним, то використавши рівняння Менделєєва – Клапейрона, визначимо тиск:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \left(\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \dots + \frac{m_n}{M_n} \right) \cdot \frac{RT}{V},$$

де m_i , M_i – маса і молярна маса i – го газу.

Закон Дж. Дальтона

«Тиск суміші газів дорівнює сумі парціальних тисків газів, з яких складається дана суміш».

Парціальним тиском називається тиск, який був би створений за даних умов (T, V) окремо одним газом із суміші.

Приклади розв'язування задач

1. Балон, що містить $V_1=0,02 \text{ м}^3$ повітря під тиском $p_1=4 \cdot 10^5 \text{ Па}$, з'єднують з балоном місткістю $V_2=0,06 \text{ м}^3$, з якого викачане повітря. Знайти тиск p , який установився в посудинах. Температура стала.

Розв'язання

Дано
 $V_1 = 0,02 \text{ м}^3$
 $V_2 = 0,06 \text{ м}^3$
 $p_1 = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$
 $p = ?$

Повітря перейде з першого балона і займе увесь об'єм

$$V = V_1 + V_2.$$

Використавши закон Бойля-Маріотта:

$$\frac{p}{p_1} = \frac{V_1}{V} \Rightarrow \frac{p}{p_1} = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \Rightarrow$$

$$p = \frac{p_1 V_1}{V_1 + V_2} = \frac{4 \cdot 10^5 \cdot 0,02}{0,02 + 0,06} = 10^5 \text{ Па}.$$

Відповідь: $p = 10^5 \text{ Па}$.

2. Скільки ртуті увійде в скляний балончик об'ємом 5 см^3 , нагрітий до температури $t_1 = 400^\circ\text{C}$, при його охолодженні до $t_2 = 16^\circ\text{C}$, якщо густина ртуті при $t = 16^\circ\text{C}$ дорівнює $\rho = 13,6 \text{ г/см}^3$?

Розв'язання

Дано
 $V = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$
 $T_1 = 400 + 273 = 673 \text{ К}$
 $T_2 = 16 + 273 = 289 \text{ К}$
 $\rho = 13,6 \text{ г/см}^3 = 13,6 \text{ кг/м}^3$
 $T = ?$

Ртуть буде втягуватись в скляний балончик внаслідок зменшення тиску повітря в скляній кулі від охолодження. Отже, ртуть, яка втягується, підтримуватиме тиск у кулі сталим, що дорівнюватиме зовнішньому тиску. Процес, при якому повітря охолоджується, вважається ізобаричним ($p = \text{const}$).

Використаємо закон Гей-Люссака:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Складемо пропорцію:

$$\frac{(V_1 - V_2)}{V_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Знайдемо, що

$$\Delta V = V_1 - V_2 = V_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right).$$

Тоді маса ртуті, яка увійде в балончик, буде:

$$m = \rho V_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right).$$

Підставивши числові значення, знайдемо:

$$m = 13,6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \left(1 - \frac{289}{673} \right) = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг} = 0,4 \text{ г}.$$

Відповідь: $m = 0,4 \text{ г}$.

3. В балоні об'ємом $V = 10 \text{ л}$ знаходиться гелій під тиском $p_1 = 1 \text{ МПа}$ при температурі $T_1 = 300 \text{ К}$. Після того, як з балона вийшло $m = 10 \text{ г}$ гелію, температура в ньому зменшилась до $T_2 = 290 \text{ К}$. Визначити тиск гелію, який залишився в балоні.

Розв'язання

Дано
 $V = 10 \text{ л} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$
 $p_1 = 1 \text{ МПа} =$
 $= 1 \cdot 10^6 \text{ Па}$
 $T_1 = 300 \text{ К}$
 $T_2 = 290 \text{ К}$
 $m = 10^{-4} \text{ кг}$

 $p_2 - ?$

Запишемо два рази рівняння Менделєєва-Клапейрона для початкового і кінцевого стану:

$$p_1 V = \frac{m_1}{M} R T_1, \quad p_2 V = \frac{m_2}{M} R T_2,$$

де m_1 і m_2 – маси гелію в початковому і кінцевому стані

$$m_1 = \frac{M p_1 V}{R T_1}, \quad m_2 = \frac{M p_2 V}{R T_2}.$$

З цих двох рівнянь виразимо маси:

$$m_1 = \frac{M p_1 V}{R T_1}, \quad m_2 = \frac{M p_2 V}{R T_2}.$$

Визначимо їх різницю:

$$m = m_1 - m_2 = \frac{M p_1 V}{R T_1} - \frac{M p_2 V}{R T_2}.$$

Тоді тиск гелію в балоні буде визначатись за формулою:

$$p_2 = \frac{R T_2}{M V} \left(\frac{M p_1 V}{R T_1} - m \right) = \frac{T_2}{T_1} p_1 - \frac{m R T_2}{M V}.$$

Підставимо числові значення:

$$p_2 = \frac{300}{290} \cdot 1 \cdot 10^6 - \frac{10 \cdot 10^{-3} \cdot 8,31 \cdot 290}{4 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 364 \cdot 10^3 \text{ Па}.$$

Відповідь: $p_2 = 364 \text{ кПа}$.

Задачі для самостійного розв'язування

1. Чому дорівнює молярна маса газу, якщо він при температурі 27°C і тиску $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ має густину, яка дорівнює $2,6 \text{ кг/м}^3$?

Відповідь: $\mu = 0,032 \text{ кг/моль}$.

2. Скільки молів і скільки молекул міститься в посудині місткістю 250 см^3 , якщо тиск газу 566 мм. рт. ст. , а температура дорівнює 10°C ?

Відповідь: $\nu = 8 \cdot 10^{-3}$ моль, $N = 48 \cdot 10^{20}$.

3. Яким має бути найбільший об'єм балона, щоб він вмщував $m=6,4 \text{ кг}$ кисню $t=20^\circ\text{C}$, якщо його стінки витримують тиск $p=16 \text{ МПа}$?

Відповідь: $V=0,0304 \text{ м}^3$.

4. Балон, що містить газ при тиску $1 \cdot 10^5 \text{ Па}$, має об'єм $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Як зміниться тиск газу в балоні, якщо його з'єднати з другим балоном, що практично не містить газу і має об'єм $10 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$? ($T=\text{const}$).

Відповідь: знизиться на $0,67 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

5. Повітря міститься в гумовій камері при нормальному атмосферному тиску. Камеру стиснули так, що її об'єм зменшився на $1/4$ попереднього об'єму. Під яким тиском буде газ в камері? Процес ізотермічний.

Відповідь: $4/3 p_0$.

6. Яка маса повітря m вийде з кімнати, що має об'єм $V=60 \text{ м}^3$, у результаті підвищення температури від $T_1=280 \text{ К}$ до $T_2=300 \text{ К}$ при нормальному тиску?

Відповідь: $m=5 \text{ кг}$.

7. У посудину, об'єм якої V , нагнітають повітря поршневим насосом, об'єм циліндра якого V_0 . Чому дорівнюватиме тиск повітря в посудині після n качань? Початковий тиск в посудині дорівнює зовнішньому тискові p_0 .

Відповідь: $\frac{V + nV_0}{V} p_0$.

2.1.4 Зміна агрегатного стану речовини

Речовина може існувати в твердому, рідкому і газоподібному станах. У твердому стані речовина зберігає форму і об'єм. В рідкому форма не зберігається, а зберігається об'єм. В газоподібному стані речовина ні форми, ні об'єму не зберігає.

Процес перетворення рідини в пару називається *випаровуванням*. Він відбувається з поглинанням певної кількості теплоти Q_n . Кількість теплоти Q , необхідної для перетворення в пару 1 кг рідини при сталій температурі, називають *питомою теплотою пароутворення*.

$$Q_n = L \cdot m,$$

де L – питома теплота пароутворення, яку вимірюють у Дж/кг ,

m – маса речовини, яка випаровується.

Процес перетворення пари в рідину називається *конденсацією*. При конденсації пари виділяється певна кількість теплоти:

$$Q_k = m \cdot L.$$

Випаровуються не тільки рідини, а й тверді тіла. Випаровування твердих тіл називають *сублімацією*.

Якщо число молекул пари, які випаровуються, дорівнює числу молекул пари, які конденсуються за той самий час, то число молекул пари

над рідиною буде сталим. Такий стан називають динамічною рівновагою пари і рідини.

Пара, що при незмінному об'ємі і сталій температурі перебуває в динамічній рівновазі зі своєю рідиною, називається *насиченою*, а відповідний тиск – *тиском насиченої пари*. Тиск насиченої пари залежить тільки від її температури. *Ненасичена пара* – пара, тиск якої менший за тиск насиченої пари при даній температурі $p < p_{\text{нас}}$.

Повітря завжди містить певну кількість водяної пари. Кількість грамів водяної пари в 1 м^3 повітря називають *абсолютною вологістю повітря*. Крім абсолютної вологості, треба знати й ступінь насичення повітря паром. Він характеризується *відносною вологістю повітря* – величиною, що дорівнює відношенню парціального тиску p водяної пари, що знаходиться у повітрі, до тиску $p_{\text{нас}}$ насиченої пари при одній і тій же температурі.

$$\varphi = \frac{p}{p_{\text{нас}}} \cdot 100\%.$$

Температуру t_p , при якій водяна пара стає насиченою, називають *точкою роси*. Нижче точки роси починається конденсація пари (випадає роса, виникає туман).

Відносну вологість повітря вимірюють психрометрами і гігрометрами. Дія психрометра ґрунтується на залежності температури рідини від вологості навколишнього повітря. Він складається з двох термометрів – «сухого» і «вологого». «Вологий» термометр вимірює температуру зволоженого шматочка тканини, яким обгорнуто його кульку.

Дія гігрометрів ґрунтується на залежності певних фізичних параметрів (електричний опір, маса, довжина) деяких тіл від вологості навколишнього повітря.

Плавлення – це процес перетворення речовини з твердого стану в рідину. Кристалічні тіла мають певну температуру плавлення і кристалізації.

Процес плавлення супроводжується поглинанням теплоти, яка витрачається на руйнування зв'язків у кристалічній решітці. Для плавлення кристалічного тіла масою m потрібно затратити кількість теплоти:

$$Q = \lambda \cdot m,$$

де λ – *питома теплота плавлення* – це кількість теплоти, яка необхідна для перетворення 1 кг речовини, взятої при температурі плавлення, у рідину з тією ж температурою. В СІ $[\lambda] = \text{Дж/кг}$.

Приклади розв'язування задач

1. Учень, виконуючи лабораторну роботу, налив 500 г води у мідний калориметр масою 200 г при температурі 8°C , а потім за допомогою трубки пустив пару при 100°C , внаслідок чого температура води

підвищилась до 28°C. Виявилось, що маса пари дорівнює 17 г. Знайти питому теплоту пароутворення води.

Розв'язання

Дано

$$m_k = 0,2 \text{ кг}$$

$$c_k = 380 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$$

$$m_в = 0,5 \text{ кг}$$

$$c_в = 4,2 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$$

$$t_1 = 8^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 100^\circ\text{C}$$

$$m_n = 0,017 \text{ кг}$$

$$\theta = 28^\circ\text{C}$$

$$L - ?$$

В теплообміні беруть участь три тіла: вода, калориметр і водяна пара. Коли водяна пара при 100°C потрапляє в холодну воду, відбувається конденсація. Внутрішня енергія пари зменшиться на величину теплоти, яка виділяється під час конденсації:

$$\Delta U = Q_{\text{кл}} = L \cdot m_n.$$

Утвориться рідина – вода, при температурі 100°C. Після цього конденсована вода охолоджується до температури змішування: $Q_{\text{сн}} = m_{\text{вп}} c_{\text{в}} (t_2 - \theta)$.

Тоді теплота, яка віддається:

$$Q_{\text{від}} = Q_k + Q_{\text{сн}}.$$

Виходячи із закону збереження енергії, вода і калориметр приймають теплоту і нагріваються до температури θ .

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{в}} + Q_k = c_{\text{в}} m_{\text{в}} (\theta - t_1) + m_k c_k (\theta - t_1).$$

Складемо рівняння теплового балансу і визначимо питому теплоту пароутворення: $m_n L + m_{\text{вп}} c_{\text{в}} (t_2 - \theta) = m_{\text{в}} c_{\text{в}} (\theta - t_1) + m_k c_k (\theta - t_1)$.

Звідки:

$$L = \frac{m_{\text{в}} c_{\text{в}} (\theta - t_1) + m_k c_k (\theta - t_1) + m_{\text{вп}} c_{\text{в}} (t_2 - \theta)}{m_n},$$

$$L = \frac{0,5 \cdot 4200(28 - 8) + 0,2 \cdot 380(28 - 8) + 0,017 \cdot 4200(100 - 28)}{0,017} = 2,3 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}.$$

Відповідь: $L = 2,3 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$.

2. Закриту посудину об'ємом 0,5 м³, яка містить 0,5 кг води, нагріли до 150°C. Як треба змінити об'єм посудини, щоб пара у ній стала насиченою? (тиск насиченої пари при 150°C становить 4,7·10⁴ Па).

Розв'язання

Дано

$$T = 0,5 \text{ кг}$$

$$V_1 = 0,5 \text{ м}^3$$

$$T = 423 \text{ К}$$

$$R = 8,31 \text{ Дж/моль}\cdot\text{К}$$

$$M = 0,018 \text{ кг/моль}$$

$$p = 4,7 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

$$V_2 - ?$$

Для пари можна застосувати газові закони. Потрібно визначити об'єм посудини, яка за даних умов містить тільки насичену пару. Запишемо рівняння Менделєєва-Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{M} RT, \quad V_2 = \frac{m}{p \cdot M} RT,$$

$$V_2 = \frac{0,5 \cdot 8,31 \cdot 423}{4,7 \cdot 10^4 \cdot 0,018} = 2,07 \text{ м}^3.$$

Тому потрібно збільшити об'єм посудини до 2,07 м³.

Відповідь: $V_2 = 2,07 \text{ м}^3$.

3. Температура повітря увечері 18°C, відносна вологість 65%. Вночі температура знизилась до 4°C. Чи випаде в цьому випадку роса?

Розв'язання

Дано
 $\varphi = 65\% = 0,65$
 $t_1 = 18^\circ\text{C}$
 $t_2 = 4^\circ\text{C}$
 $\rho_a = ?$

Щоб визначити, чи випаде роса, треба знати абсолютну вологість повітря при 18°C і порівняти її з абсолютною вологістю при 4°C , яка береться з таблиці (при 4°C , $\rho_a = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$). Різниця в показках дасть кількість конденсованої пари, що переходить у росу.

$$\rho_a = \frac{\varphi \cdot \rho_{\text{нас}}}{100\%} = \frac{65 \cdot 15,4 \cdot 10^{-3}}{100\%} = 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Роса випаде, тому що при 4°C абсолютна вологість $6,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$, а при 18°C вона становить 10^{-2} кг/м^3 . Отже, $10^{-2} - 6,4 \cdot 10^{-3} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$.

Відповідь: випаде.

4. Яку кількість води треба випарувати у приміщенні об'ємом 100 м^3 при температурі 17°C і відносній вологості 40% для того, щоб збільшити вологість до 70% ?

Розв'язання

Дано
 $T = 290 \text{ К}$
 $V = 100 \text{ м}^3$
 $\varphi_1 = 40\%$
 $\varphi_2 = 70\%$
 $p_n = 1,93 \cdot 10^3 \text{ Па}$
 $M = 0,018 \text{ кг/моль}$
 $R = 8,31 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$
 $\Delta T = ?$

Визначимо масу водяної пари, що міститься у приміщенні при вологості 100% :

$$m = M p_n \frac{V}{R \cdot T}.$$

За означенням відносної вологості і враховуючи, що тиск газу пропорційний його масі, маємо:

$$m = M \cdot \varphi \cdot p_n \frac{V}{R \cdot T}.$$

Різниця мас водяної пари у приміщенні при різних значеннях відносної вологості: $\Delta m = m_2 - m_1 = M \cdot p(\varphi_2 - \varphi_1) \frac{V}{R \cdot T}$,

$$\Delta m = \frac{0,018 \cdot 1,93 \cdot 10^3 \cdot 0,3 \cdot 10^2}{8,31 \cdot 290} = 0,432 \text{ кг}.$$

Відповідь: $\Delta m = 0,432 \text{ кг}$.

Задачі для самостійного розв'язання

1. Скільки треба затратити теплоти, щоб $0,5 \text{ кг}$ води при температурі 20°C довести до температури кипіння і перетворити у пару?

Відповідь: $1,3 \cdot 10^6 \text{ Дж}$.

2. Яка температура установиться у залізному калориметрі масою $0,07 \text{ кг}$, у якому міститься $0,2 \text{ кг}$ води при температурі 18°C , якщо у воду впустили $0,01 \text{ кг}$ пари при 100°C ?

Відповідь: $319,5 \text{ К}$.

3. На електроплитці потужністю 600 Вт , яка має ККД 45% , нагрілося $1,5 \text{ кг}$ води, взятої при 10°C , до 100°C , при цьому 5% її перетворилось в пару. Визначити час нагрівання.

Відповідь: 45 хв .

4. Температура повітря 15°C , відносна вологість повітря 40%. Знайти точку роси і абсолютну вологість повітря.

Відповідь: 274 K , $\rho_a=0,005\text{ кг/м}^3$.

5. У посудині, що містить 10 кг льоду при температурі 0°C , влили 3 кг води при 90°C . Яка установиться температура? Чи розплавиться весь лід? Якщо ні, то яка його частина залишиться в твердому стані. Теплоємність посудини не враховувати.

Відповідь: 0°C . Ні. 66%.

6. У 4 м^3 повітря при температурі 16°C міститься 40 г водяної пари. Визначити відносну вологість.

Відповідь: 74%.

7. Відносна вологість повітря ввечері при температурі 18°C дорівнює 55%. Чи випаде роса, якщо вночі температура знизиться до 8°C ?

Відповідь: не випаде.

2.1.5 Поверхневий натяг і деякі властивості рідин

На поверхні поділу рідини і її насичувальної пари виникає сила, зумовлена різною молекулярною взаємодією суміжних середовищ (рис.27).

Кожна молекула, розміщена всередині об'єму рідини, рівномірно оточена сусідніми молекулами і взаємодіє з ними, а рівнодійна цих сил дорівнює нулю. В поверхневому шарі внаслідок неоднорідності оточення на молекулу діє сила R , не скомпенсована силами з боку інших молекул рідини. Внаслідок цього рідина в поверхневому шарі перебуває в розтягнутому напруженому стані. Густина рідини в цьому шарі менша, ніж усередині. Молекули поверхневого шару перебувають на більших відстанях одна від одної, ніж молекули всередині рідини, тому їх потенціальна енергія більша, ніж в інших молекул. Різницю між потенціальними енергіями молекул усередині рідини та молекул у її поверхневому шарі називають *поверхневою енергією*.

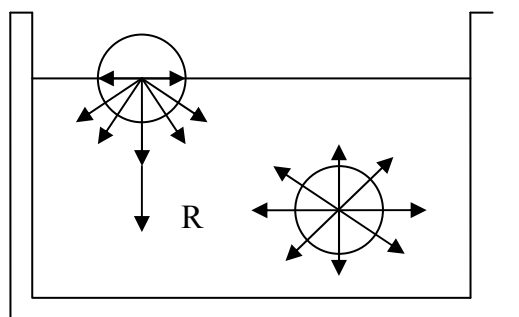


Рисунок 27

Відношення поверхневої енергії U_n будь-якої частини поверхні рідини до площі S цієї поверхні називається коефіцієнтом поверхневого натягу α .

$$\alpha = \frac{U_n}{S}.$$

Явище виникнення сил, що перешкоджають збільшенню площі вільної поверхні рідини:

$$F = \alpha \cdot l,$$

де l – довжина границі поверхневого шару,

α – коефіцієнт поверхневого натягу,

F – сила поверхневого натягу.

Рідина може змочувати тверде тіло і може не змочувати тверде тіло. Якщо сили взаємодії молекул твердого тіла і молекул рідини більші від сил взаємодії між молекулами рідини, то рідина змочує тверде тіло (ртуть-залізо). У протилежному разі рідина не змочує твердого тіла (ртуть-скло).

Викривлену поверхню рідини у вузьких циліндричних трубах або біля стінок посудини називають *меніском*.

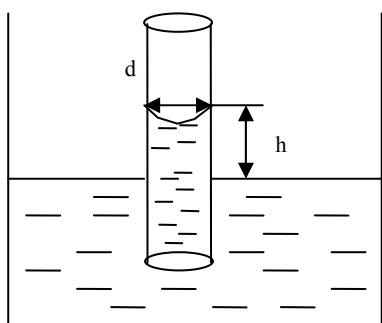


Рисунок 28

Коли рідина змочує поверхню – меніск угнутий, коли не змочує – опуклий. Викривлення меніска відбувається в тонких трубках, які називаються *капілярами*. Змочуюча рідина, густина якої ρ , піднімається в капілярах на висоту h над загальним рівнем рідини (рис. 28):

$$h = \frac{2\alpha}{\rho \cdot g \cdot r},$$

де r – радіус капіляра.

Приклади розв'язування задач

- Дві пластини занурено в спирт. На скільки підніметься спирт, якщо відстань між пластинами зменшиться з 1 до 0,5мм? Змочування пластин вважати повним.

Дано

$$\alpha = 0,022 \text{ Н/м}$$

$$\rho = 0,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$r_1 = 1 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ м}$$

$$r_2 = 0,5 \text{ мм} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\Delta h = ?$$

Розв'язання

Дві пластини будемо розглядати як капіляр.

Тоді висоти піднімання спирту в капілярі:

$$h_1 = \frac{2\alpha}{\rho \cdot g \cdot r_1}, \quad h_2 = \frac{2\alpha}{\rho \cdot g \cdot r_2}.$$

Відповідно:

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \frac{2\alpha}{\rho g} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right).$$

$$\text{Зробимо обчислення: } \Delta h = \frac{2 \cdot 0,022}{0,8 \cdot 10^3 \cdot 9,8} \left(\frac{1}{0,5 \cdot 10^{-3}} - \frac{1}{1 \cdot 10^{-3}} \right) = 5,6 \text{ мм.}$$

Відповідь: $\Delta h = 5,6 \text{ мм}$.

- Яким має бути радіус капілярної трубки, щоб при повному змочуванні вода піднялась в ній на 8см? Коефіцієнт поверхневого натягу води становить $\alpha = 7 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}$.

Розв'язання

Дано
 $\alpha = 7 \cdot 10^{-2}$ Н/м
 $h = 0,8 \cdot 10^{-2}$ м
 $g = 9,8$ м/с²
r-?

При повному змочуванні сила поверхневого натягу, що діє на рідину, дорівнює за модулем вазі стовпа води, що піднялась у трубці.

$$2\pi \cdot r \cdot \alpha = mg,$$

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot h \cdot S = \rho \cdot h \cdot \pi \cdot r^2,$$

$$2\pi \cdot \alpha \cdot r = \rho \cdot h \cdot \pi \cdot r^2,$$

$$r = \frac{2\alpha}{\rho \cdot g \cdot h} = \frac{2 \cdot 7 \cdot 10^{-2}}{10^3 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 9,8} = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Відповідь: 0,17мм.

3. Яке зусилля треба прикласти, щоб відірвати кільце масою $7 \cdot 10^{-3}$ кг від поверхні гасу, коли середній діаметр кільця 100 мм?

Розв'язання

Дано
 $d = 100$ мм = 0,1 м
 $g = 9,8$ м/с²
 $m = 7 \cdot 10^{-3}$ кг
 $\alpha = 0,024$ Н/м
F-?

Сила пружності пружини динамометра зрівноважується вагою кільця і силою поверхневого натягу, прикладених до зовнішнього і внутрішнього поверхонь кільця.

$$F = mg + 2 \cdot \pi \cdot d \cdot \alpha,$$

$$F = 7 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8 + 2 \cdot 3,14 \cdot 0,1 \cdot 0,024 = 0,84 \text{ Н.}$$

Відповідь: $F = 0,84$ Н.

4. Яка кількість енергії вільної поверхні рідини звільниться, коли деяка кількість водяних крапель радіусом $2 \cdot 10^{-6}$ м зіллється в одну велику краплю радіусом $2 \cdot 10^{-3}$ м?

Розв'язання

Дано
 $r = 2 \cdot 10^{-6}$ м
 $R = 2 \cdot 10^{-3}$ м
 $\alpha = 0,072$ Н/м
 ΔE -?

Позначимо кількість малих крапель через n , тоді загальна площа S всіх n малих крапель: $S = 4\pi \cdot r^2 \cdot n$.

$$\text{Площа великої краплі: } S_0 = 4\pi \cdot R^2.$$

Коли малі водяні краплі зіллються в одну краплю, загальна площа поверхні великої краплі буде меншою, ніж усіх n малих крапель:

$$\Delta S = S - S_0.$$

При цьому деяка частина енергії вільної поверхні рідини виділиться:

$$\Delta E = (S - S_0) \cdot \alpha = 4\pi(r^2 \cdot n - R^2) \cdot \alpha.$$

Кількість малих крапель n визначимо, врахувавши рівність об'ємів:

$$V_0 = n \cdot V; \quad 4/3\pi R^3 = 4/3\pi \cdot r^3 \cdot n; \quad n = \frac{R^3}{r^3}. \text{Тоді: } \Delta E = 4\pi R^2 \left(\frac{R}{r} - 1 \right) \cdot \alpha,$$

$$\Delta E = 4 \cdot 3,14 (2 \cdot 10^3) \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-6}} - 1 \right) \cdot 0,072 = 3,5 \cdot 10^3 \text{ Дж.}$$

Відповідь: $\Delta E = 3,5 \cdot 10^3$ Дж.

Задачі для самостійного розв'язання

1. Визначити вагу водяної краплі, яка відривається від трубки діаметром 10^{-3} м, вважаючи, що діаметр шийки краплі дорівнює внутрішньому діаметру трубки.
Відповідь: $22,6 \cdot 10^{-5}$ Н.
2. У трубці вода піднімається на висоту 0,06 м, а гас – на висоту $31,2 \cdot 10^3$ м. Знайти коефіцієнт поверхневого натягу гасу, якщо коефіцієнт поверхневого натягу води 0,07 Н/м.
Відповідь: 0,029 Н/м.
3. Яку роботу треба виконати, щоб надути мильну бульбашку радіусом 4 см? Коефіцієнт поверхневого натягу мильного розчину дорівнює 40 мН/м.
Відповідь: 16 мДж.
4. Визначити масу води, що піднялась по капілярній трубці діаметром 0,5 мм.
Відповідь: $m = 12$ мг.
5. У капілярній трубці, радіус якої 0,5 мм, рідина піднялась на висоту 11 мм. Визначити густину цієї речовини, якщо її коефіцієнт поверхневого натягу становить 0,022 Н/м.
Відповідь: 820 кг/м^3 .
6. На скільки опуститься вода у капілярній трубці радіусом $0,1 \cdot 10^{-3}$ м при підвищенні температури на 80°C , якщо з підвищенням температури на 1°C коефіцієнт поверхневого натягу зменшується на $1,5 \cdot 10^{-4}$ Н/м?
Відповідь: $\Delta h = 12 \cdot 10^{-3}$ м.

2.2 Основи термодинаміки

2.2.1 Робота в термодинаміці. Внутрішня енергія

Термодинаміка – розділ фізики, який вивчає найзагальніші закономірності процесів у макроскопічних системах, що знаходяться в стані термодинамічної рівноваги, і процесів переходу між такими станами.

Термодинамічна система – це сукупність мікроскопічних тіл, які взаємодіють і обмінюються енергією між собою і навколишнім середовищем.

Термодинамічним процесом називається перехід системи з початкового стану в кінцевий через послідовність проміжних станів. Процеси бувають *оборотні і необоротні*. *Оборотним* називається процес, при якому можна здійснити оборотний перехід системи з кінцевого стану в початковий через ті ж самі проміжні стани, щоб у навколишніх тілах не сталося жодних змін. Оборотний процес – це фізична абстракція.

Необоротний процес супроводжується тертям або теплопередаванням від нагрітого тіла до холодного.

Термодинамічні параметри – параметри стану – сукупність фізичних величин, що характеризують властивості і стан термодинамічної системи. Такими параметрами є температура T , об'єм V , тиск p . Стан системи, у

якому вона може перебувати досить довго (параметри стану у часі є незмінними), називається *термодинамічною рівновагою*

Внутрішня енергія – це сума енергій молекулярних взаємодій і енергії теплового руху молекул. Оскільки потенціальна енергія взаємодії молекул ідеального газу дорівнює нулю, то внутрішня енергія ідеального газу дорівнює сумі кінетичних енергій молекул.

$$U = NE = \nu N_A \frac{3}{2} kT = \frac{3m}{2M} RT = \frac{3}{2} pV.$$

Внутрішня енергія ідеального газу пропорційна масі газу і його термодинамічній температурі. Внутрішню енергію можна змінити двома способами: теплообміном і виконанням механічної роботи.

Теплообмін – зміна внутрішньої енергії за рахунок передавання її від одного тіла до іншого без виконання роботи.

Виконання механічної роботи:

1. При деформації тіла нагріваються.
2. Нагрівання тіл, яке зумовлено виконанням роботи проти сил тертя.

Теплопередача між тілами можлива за рахунок теплопровідності, конвекції, випромінювання.

Теплопровідність – обмін енергією між тілами, що перебувають у безпосередньому контакті.

Конвекція – перенесення енергії потоками рідини або газів.

Випромінювання – перенесення енергії електромагнетними хвилями, видимим світлом, інфрачервоним випромінюванням.

Навколишні тіла (зовнішня сила) виконують над газом роботу A , причому робота в обох випадках однакова, її значення різняться лише знаком: $A = A'$.

В результаті зміни об'єму на ΔV під час ізобарного процесу робота дорівнює: $A = p(V_2 - V_1) = p\Delta V$.

Під час розширення газу $V_2 > V_1$ - робота додатна. Під час стискання газу $V_2 < V_1$ - робота від'ємна.

Чисельно робота A дорівнює площі відповідної криволінійної трапеції, обмеженої графіком залежності p від V .

Теплоємністю тіла називають відношення кількості теплоти, необхідної для підвищення його температури від значення T_1 до значення T_2 , до різниці цих температур $\Delta T = T_2 - T_1$:

$$C = \frac{Q}{\Delta T},$$

де Q – кількість теплоти,

C – теплоємність тіла,

ΔT - різниця температур.

Питома теплоємність тіла – характеристика речовини, що визначається кількістю теплоти, яка необхідна для нагрівання 1 кг речовини на 1 К.

$$c = \frac{Q}{m(T_2 - T_1)} \Rightarrow, Q = cm\Delta T.$$

Вимірюється в СІ питома теплоємність Дж/ кг·К.

Тіла, нагріті до певної температури, віддають холоднішим тілам деяку кількість теплоти. Знаючи початкові температури, маси всіх тіл і питоми теплоємності, можна обчислити невідому теплоємність C_x твердого тіла, виходячи з так званого *рівняння теплового балансу*, яке формулюється так: кількість теплоти Q_1 , яку віддає більш нагріте тіло, дорівнює кількості теплоти, що її набуває менш нагріте тіло Q_2 .

Якщо в теплообміні бере участь кілька тіл, умова їхньої рівноваги така:

$$c_1 m_1 (t_0 - t_1) + c_2 m_2 (t_0 - t_2) + \dots + c_n m_n (t_0 - t_n) = 0.$$

Це рівняння виражає закон збереження енергії при тепловому обміні і називається рівнянням теплового балансу.

Перший закон термодинаміки

Збільшення внутрішньої енергії тіла може бути спричинене передаванням кількості теплоти Q , а також виконанням роботи A . Перший закон термодинаміки формулюється так: зміна внутрішньої енергії ΔU системи дорівнює сумі роботи A , виконаної над системою зовнішніми силами і наданої їй кількості теплоти Q .

$$\Delta U = Q + A.$$

Якщо роботу виконує система над зовнішніми тілами, то $A' = -A$, тоді

$$Q = \Delta U + A'.$$

Кількість теплоти Q , що надана системі, йде на збільшення її внутрішньої енергії ΔU і виконання системою роботи A' проти зовнішніх сил.

Ізохорний процес:

$$\Delta V = 0, A = 0, \text{ отже } \Delta U = Q = c_V m (T_2 - T_1),$$

де c_V - питома теплоємність при сталому об'ємі.

Ізобарний процес:

$$p = \text{const}, A' = p\Delta V,$$

$$A' = \frac{m}{M} R\Delta V,$$

$$Q = \Delta U + A',$$

$$Q = c_V m \Delta T + \frac{m}{M} R \Delta T.$$

Ізотермічний процес: $\Delta T = 0, \Delta U = 0$, якщо ізотермічне нагрівання, $A > 0, Q > 0$ газ отримує енергію ззовні.

При ізотермічному стисканні $A < 0, Q < 0$, тому газ віддає енергію навколишньому середовищу. Процес, який відбувається без теплообміну з навколишніми тілами, називається *адіабатичним*. Адіабатичними можна наближено вважати процеси, які швидко відбуваються. Отже, в такому

процесі $Q = 0$, $\Delta U = A$, тобто робота виконується за рахунок зміни внутрішньої енергії тіла.

Другий закон термодинаміки

Неможливий круговий процес, єдиним результатом якого є перетворення теплоти, одержаної від нагрівника, у еквівалентну їй роботу.

М. Планк: «У природі неможливий процес, єдиним результатом якого був би перехід теплоти повністю в роботу».

К. Клаузіс: «Теплота не може сама собою переходити від тіла з нижчою температурою до тіла з вищою температурою».

Приклади розв'язування задач

1. Тіло масою 5 кг падає з висоти 3 м. На скільки збільшиться внутрішня енергія тіла (втрату енергії в навколишньому середовищі до уваги не брати)?

Розв'язання

Дано $m = 5 \text{ кг}$ $h = 3 \text{ м}$	Зміну внутрішньої енергії тіла визначимо з рівняння теплового балансу, складеного на підставі повного переходу механічної енергії падіння у внутрішню енергію:
$\Delta U - ?$	

$$A = \Delta U, \text{ або } A = Q = mgh,$$

$$\Delta U = mgh = 5 \cdot 9,8 \cdot 3 \approx 150 \text{ Дж.}$$

Відповідь: внутрішня енергія збільшилася на 150 Дж.

2. Газ, який займає об'єм 20 л за нормальних умов, було ізобарно нагріто до 80°C. Визначити роботу розширення газу.

Розв'язання

Дано $V = 20 \text{ л} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ $T_1 = 273 \text{ К}$ $T_2 = 353 \text{ К}$ $p_1 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$	Робота розширення газу в ізобарному процесі визначається за формулою $A = p\Delta V$. З рівняння Менделєєва-Клапейрона :
$A - ?$	$A = \frac{m}{M} R \Delta T.$ Кількість молів:
	$\nu = \frac{m}{M} = \frac{p_1 V_1}{RT_1},$ звідси робота дорівнює:

$$A = \frac{p_1 V_1}{RT_1} R \Delta T = \frac{p_1 V_1 \Delta T}{T_1}.$$

Робота розширення газу:

$$A = \frac{1,01 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 80}{273} = 590 \text{ Дж.}$$

Відповідь: $A = 590 \text{ Дж}$.

3. У калориметрі змішують три рідини, які хімічно не взаємодіють, масою: $m_1 = 1$ кг, $m_2 = 10$ кг, $m_3 = 5$ кг, відповідно з температурами 6°C , -40°C , 60°C і питомими теплоємностями $2000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, $4000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, $2000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.
Визначити температуру θ суміші і кількість теплоти, потрібну для наступного нагрівання суміші до $t = 6^\circ\text{C}$.

Розв'язання

Дано

$$m_1 = 1 \text{ кг}, m_2 = 10 \text{ кг}$$

$$m_3 = 5 \text{ кг}$$

$$c_3 = 2000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$c_1 = 2000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$c_2 = 4000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$T = 279 \text{ К}, T_1 = 279 \text{ К}$$

$$T_2 = 233 \text{ К}, T_3 = 333 \text{ К}$$

$$Q_{-1}; \theta_{-1}$$

З рівняння теплового балансу знаходимо шукану температуру θ :

$$m_1 c_1 (\theta - T_1) + m_2 c_2 (\theta - T_2) + m_3 c_3 (\theta - T_3) = 0,$$

$$\theta = \frac{m_1 c_1 T_1 + m_2 c_2 T_2 + m_3 c_3 T_3}{m_1 c_1 + m_2 c_2 + m_3 c_3},$$

$$\theta = \frac{1 \cdot 2000 \cdot 279 + 10 \cdot 4000 \cdot 233 + 5 \cdot 2000 \cdot 333}{1 \cdot 2000 + 10 \cdot 4000 + 5 \cdot 2000} =$$

$$= 254 \text{ К.}$$

Щоб суміш нагріти до температури T , потрібна кількість теплоти:

$$Q = m_1 c_1 (T - \theta) + m_2 c_2 (T - \theta) + m_3 c_3 (T - \theta),$$

$$Q = (2000 \cdot 1 + 4000 \cdot 10 + 2000 \cdot 5)(279 - 254) =$$

$$= 1,3 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

Відповідь: $\theta = 254 \text{ К}$; $Q = 1,3 \cdot 10^6 \text{ Дж}$.

Задачі для самостійного розв'язування

1. Газ, який займає об'єм 20 л за нормальних умов, ізобарно нагріто до 80°C . Визначити роботу розширення газу.

Відповідь: 550 Дж.

2. В циліндрі під тиском $19,6 \cdot 10^4$ Па міститься 1 м^3 повітря при 273 К. Яка буде виконана робота при ізобаричному нагріванні його на 10 К?

Відповідь: $A = 7330$ Дж.

3. Повітря перебуває при 273 К під тиском $14,7 \cdot 10^4$ Па. Яку роботу виконує 10^{-3} м^3 повітря при ізобаричному розширенні, якщо температура його підвищиться до 293 К?

Відповідь: 11 Дж.

4. Під час ізотермічного розширення ідеальний газ виконав роботу 20 Дж. Яку кількість теплоти надано газу?

Відповідь: 20 Дж.

5. Коли у воду, що має температуру 10°C , вкинули тіло, нагріте до 100°C , через якийсь час встановилась загальна температура 40°C . Яку температуру матиме вода, якщо, не виймаючи першого тіла, в неї кинули ще одне таке саме тіло, нагріте теж до температури 100°C ?

Відповідь: 55°C.

6. Для приготування ванни, місткість якої 200 л, змішали холодну воду при температурі 10°C з гарячою при температурі 60°C. Які об'єми холодної і гарячої води треба взяти, щоб у ванні встановилася температура 40°C?

Відповідь: 80 л, 120 л.

7. Для ізобарного нагрівання 800 молів газу на 500 К їм було надано 9,4 МДж теплоти. Визначити роботу газу, а також його внутрішню енергію.

Відповідь: 3,3 МДж, 6,1 МДж.

2.2.2 Тепловий двигун. Ідеальна теплова машина. Цикл Карно

Тепловий двигун – це пристрій, який перетворює внутрішню енергію палива в механічну. Енергія, яка виділяється під час згорання палива, через теплообмін передається газу. Газ, розширюючись, виконує роботу проти зовнішніх сил і приводить у рух механізм. Будова теплового двигуна подана на (рис. 29).

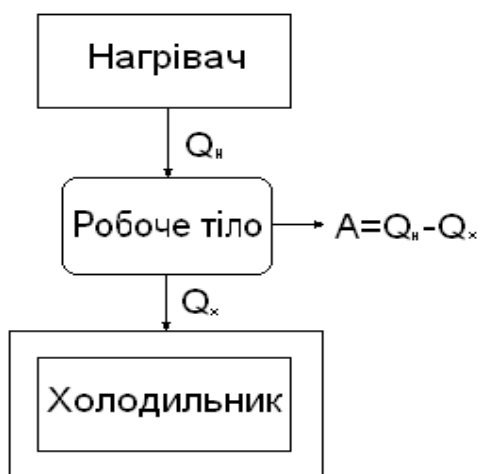


Рисунок 29

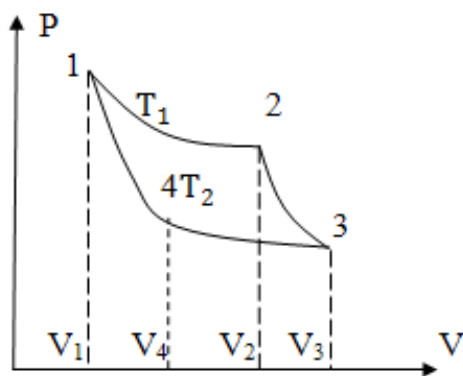


Рисунок 30

Для того щоб двигун працював циклічно, газ стискається, віддаючи теплоту холодильнику (навколишньому середовищу). Робоче тіло двигуна дістає кількість теплоти Q_n від нагрівника, виконує роботу A над зовнішніми тілами і передає кількість теплоти Q_x холодильнику. Оскільки система після закінчення циклу повертається до початкового стану, зміна внутрішньої енергії дорівнює нулю ($\Delta U = 0$) і за першим законом термодинаміки

$$A = Q_n - Q_x,$$

де A - механічна робота, яку виконує газ,

Q_n - кількість теплоти, одержаної від нагрівника,

Q_x - кількість теплоти, переданої

холодильнику.

Величина $\eta = \frac{A}{Q} = \frac{Q_n - Q_x}{Q_n} \cdot 100\%$ називається коефіцієнтом корисної дії (ККД) машини.

Французький інженер С. Карно з'ясував умови роботи ідеальної теплової машини. З усіх теплових машин, які працюють з нагрівником, що має температуру T_n , і холодильником, що має температуру T_x , найбільший коефіцієнт корисної дії має теплова машина, що працює за оборотним циклом Карно, який складається з двох ізотерм і двох адіабат (рис. 30).

ККД циклу Карно можна записати через температуру нагрівника і холодильника:

$$\eta = \frac{T_n - T_x}{T_n} = 1 - \frac{T_x}{T_n}.$$

Доведено, що будь-яка реальна теплова машина, в якій температура нагрівника і холодильника відповідні T_n і T_x , не може мати ККД, більший за ККД ідеальної теплової машини: η_{max} , тобто $\eta \leq \eta_{max}$.

Приклади розв'язування задач

1. Теплова машина, яка працює за циклом Карно, отримує від нагрівника за кожен цикл 2000 Дж теплоти. Температура нагрівника 500 К, холодильника – 300 К. Яку механічну роботу виконує дана машина за один цикл та яку кількість теплоти при цьому буде віддано холодильнику? Визначте ККД даної машини.

Розв'язання

Дано
$Q_n = 2000$ Дж
$T_n = 500$ К
$T_x = 300$ К
$A - ?$, $Q_x - ?$, $\eta - ?$

Оскільки теплова машина працює за циклом Карно то:

$$1 - \frac{Q_x}{Q_n} = 1 - \frac{T_x}{T_n} \quad \text{або} \quad \frac{Q_x}{Q_n} = \frac{T_x}{T_n},$$

$$Q_x = \frac{2000 \cdot 300}{500} = 1200 \text{ Дж.}$$

Механічна робота, яку виконує дана машина, дорівнює:

$$A = Q_n - Q_x = 2000 - 1200 = 800 \text{ Дж.}$$

$$\eta = \frac{T_n - T_x}{T_n} = \frac{500 - 300}{500} = 0,4.$$

Відповідь: $Q_x = 1200$ Дж, $A = 800$ Дж, $\eta = 0,4$.

2. Температура нагрівника ідеальної теплової машини 500 К, температура холодильника 400 К. Визначити ККД і корисну потужність машини, якщо нагрівник передає їй 1700 Дж теплоти за секунду.

Розв'язування

Дано
$T_n = 500$ К, $T_x = 400$ К
$t = 1$ с
$Q_n = 1700$ Дж
$\eta =$
$P = ?$

$$\eta = \frac{T_n - T_x}{T_n} = \frac{500 - 400}{500} = 0,2,$$

$$\eta = \frac{A_k}{A_3} = \frac{A_k}{Q_n},$$

$$A_k = Q \cdot \eta = 1700 \cdot 0,2 = 340 \text{ Дж},$$

$$P_k = \frac{A_k}{t} = 340 \text{ Вт}.$$

Відповідь: 0,2; 340 Вт.

3. Потужність двигуна на моторолері 882 Вт. На відстані 100 км він витрачає 1,5 кг бензину. ККД двигуна 15%. Визначити швидкість, з якою він проходить відстань 100 км.

Розв'язання

Дано

$$S = 100 \text{ км} = 10^5 \text{ м}$$

$$\eta = 0,15; m = 1,5 \text{ кг}$$

$$q = 462 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$$

$$P = 882 \text{ Вт}$$

$g - ?$

Виходячи з ККД:

$$\eta = \frac{A_k}{Q} \Rightarrow A_k = \eta Q.$$

Знаючи механічну роботу і скориставшись формулою, яка пов'язує потужність з роботою, визначаємо швидкість:

$$A = Pt, t = \frac{S}{g}, \text{ тоді}$$

$$\frac{PS}{g} = A,$$

$$Q = qm,$$

$$\text{отже } g = \frac{PS}{\eta qm} = 8,5 \text{ м/с}.$$

Відповідь: 8,5 м/с.

4. Ідеальна теплова машина, яка працює за циклом Карно, отримує від нагрівника за кожен цикл 2500 Дж теплоти. Температура нагрівника 400 К, холодильника 300 К. Яку механічну роботу виконує дана машина за один цикл та яка кількість теплоти при цьому віддається холодильнику? Визначити ККД машини.

Розв'язання

Дано

$$Q_1 = 2500 \text{ Дж}$$

$$T_1 = 400 \text{ К}$$

$$T_2 = 300 \text{ К}$$

$A - ?$

$Q_2 - ?$

$\eta - ?$

Оскільки теплова машина працює за циклом Карно, то:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Звідси:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow Q_2 = \frac{Q_1 T_2}{T_1}.$$

За законом збереження енергії:

$$A = Q_1 - Q_2.$$

Коефіцієнтом корисної дії:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, Q_2 = \frac{2500 \cdot 300}{400} = 1875 \text{ Дж},$$

$$A = 2500 - 1875 = 625 \text{ Дж},$$

$$\eta = \frac{400 - 300}{400} = 0,25.$$

Відповідь: $Q = 1875$ Дж, $A = 625$ Дж, $\eta = 0,25$.

Задачі для самостійного розв'язування

1. Температура нагрівника ідеальної теплової машини становить 117°C , а холодильника 27°C . Кількість теплоти, що її дістає машина від нагрівника за 1 с, дорівнює 60 кДж. Обчисліть ККД машини, кількість теплоти, яку забирає холодильник за 1с, і потужність машини.

Відповідь: $\eta = 23\%$, $Q = 46$ кДж, $P = 14$ кВт.

2. В ідеальній тепловій машині за рахунок кожного кілоджоуля енергії, що її дає нагрівник, виконується робота 300 Дж. Визначити ККД машини і температуру нагрівника, якщо температура холодильника 280 К.

Відповідь: $\eta = 30\%$; $T_H = 400$ К.

3. У паровій турбіні витрачається 0,35 кг дизельного пального на 1 кВт·год. Температура пари, яка надходить у турбіну, дорівнює 250°C , температура холодильника 30°C . Обчислити фактичний ККД турбіни і порівняти його з ККД ідеальної теплової машини, яка працює за тих самих температурних умов.

Відповідь: $\eta_1 = 24\%$; $\eta_2 = 42\%$.

4. Двигун внутрішнього згорання витрачає за 1 год 25,3 кг нафти. ККД двигуна 25%. Визначити потужність двигуна.

Відповідь: 81 кВт.

5. Якби кінетична енергія автомобіля «Волга» масою 1500 кг, що рухається із швидкістю 33,3 м/с, раптово перетворилася на тепло, то скільки б теплоти виділилося?

Відповідь: 816,75 кДж.

3 ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ

3.1 Електрика

3.1.1 Електричне поле. Закон Кулона. Напруженість поля

Електростатика – це розділ фізики, який вивчає взаємодію заряджених тіл або частинок. *Електричний заряд* – це фізична величина, яка характеризує властивості тіл вступати за певних умов в електромагнетні взаємодії.

Електризація – це процес передавання (перенесення) на тіло електричного заряду. Одиниця електричного заряду в СІ– Кулон – $[q]$ – Кл.

Електричні заряди поділяються на позитивні і негативні. Носіями електричного заряду є: електрон (e) – елементарна частинка, яка має негативний заряд $e = -1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл, протон – елементарна частинка, заряд якої протилежний заряду електрона $q = +1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Сумарний заряд електрично-ізолюваної системи не змінюється. Електричні заряди не створюються і не зникають, а тільки передаються від одного тіла до іншого або перерозподіляються всередині даного тіла:

$$\sum_{i=1}^n Q_i = \text{const.}$$

Це твердження називається законом збереження електричного заряду. Точкові заряди – заряджені тіла, розміри яких значно менші порівняно з відстанню між ними. Однойменні заряди відштовхуються, різнойменні заряди притягуються. Французький учений Ш. Кулон експериментально встановив основний закон електростатики – закон взаємодії нерухомих точкових зарядів: два точкових заряди q_1 і q_2 , відстань між якими r , взаємодіють із силою F , прямо пропорційною модулю добутків зарядів і обернено пропорційною квадрату відстані між ними та направленою вздовж прямої, що їх з'єднує:

$$F = \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2},$$

$$\text{де } \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/\text{Н} \cdot \text{м}^2 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/Н},$$

ϵ_0 – електрична стала,

ϵ – діелектрична проникність середовища – показує, в скільки разів сила F взаємодії зарядів у даному середовищі менша за силу F_0 їх взаємодії у вакуумі.

$$\epsilon = \frac{F}{F_0}.$$

$$\text{Для вакууму } k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}.$$

$$\text{Тоді закон Кулона } F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

Навколо електричних зарядів існує електричне поле. Силова характеристика, що чисельно дорівнює відношенню сили, яка діє на заряд, поміщений у дану точку простору, до значення цього заряду, називається *напруженістю електричного поля*.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}.$$

Сила F_q , що діє на заряд q , поміщений в електричне поле з напруженістю \vec{E} :

$$\vec{F}_q = q\vec{E}.$$

Напрямок напруженості електричного поля збігається з напрямком сили, що діє на позитивний заряд у даній точці ($q > 0$). Напрями векторів \vec{E} і \vec{F} протилежні, якщо $q < 0$.

За принципом суперпозиції полів результуюча напруженість електричного поля кількох зарядів дорівнює геометричній сумі напруженостей полів кожного окремого заряду.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots$$

Напруженість електричного поля точкового заряду:

$$E = k \frac{q}{r^2} = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}$$

Напруженість рівномірно зарядженої нескінченної площини:

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0},$$

де $\sigma = \frac{q}{S}$ - поверхнева густина заряду.

Напруженість електричного поля сфери радіуса R , заряд якої рівномірно розподілений по її поверхні:

$$E = 0, \text{ при } r < R,$$

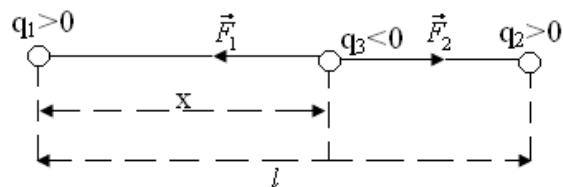
$$E = k \frac{q}{r^2} = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \text{ при } r \geq R.$$

Приклади розв'язування задач

1. У повітрі на відстані l один від одного закріплено два точкові заряджені тіла відповідно із зарядами $+Q$ і $+4Q$. Де треба помістити заряд $(-Q)$, щоб він був у рівновазі?

Розв'язання

Дано
 $q_1 = Q$
 $q_2 = 4Q$
 $\epsilon = 1$
 l
 $x - ?$



$$F_1 = \frac{Q_1 Q_3}{4\pi\epsilon_0 x^2} = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0 x^2}, \quad F_2 = \frac{Q_2 Q_3}{4\pi\epsilon_0 (l-x)^2} = \frac{4Q^2}{4\pi\epsilon_0 (l-x)^2}$$

Заряд Q_3 перебуває в рівновазі, якщо $|F_1| = |F_2|$.

$$\frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0 x^2} = \frac{4Q^2}{4\pi\epsilon_0 (l-x)^2},$$

$$(l-x)^2 = 4x^2,$$

$$l-x = 2x, \quad x = \frac{l}{3}.$$

Відповідь: на відстані $\frac{l}{3}$ від заряду Q .

2. Дві однакові кульки масою по 0,2 г кожна підвішені на нитках завдовжки 50 см. Після надання кулькам однакових зарядів вони відхилились на відстань 10 см. Визначити заряди, які були передані кулькам.

Дано

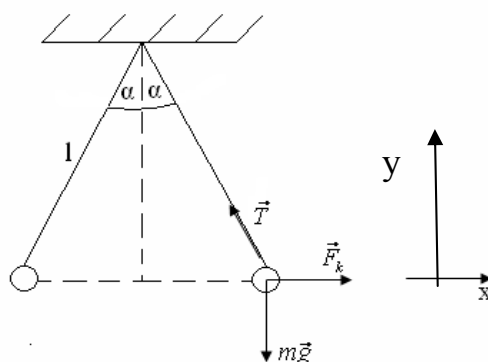
$$m_1 = m_2 = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$l = 0,5 \text{ м}$$

$$r = 0,1 \text{ м}$$

$$q = ?$$

Розв'язання



Умови рівності для кожної кульки: $m\vec{g} + \vec{T} + \vec{F}_k = 0$.

Спроектуємо на координатні осі:

$$Ox: -T \sin \alpha + F_k = 0 \Rightarrow F_k = T \sin \alpha,$$

$$Oy: T \cos \alpha - mg = 0 \Rightarrow T \cos \alpha = mg.$$

Отже,

$$T \cos \alpha = mg, \quad (1)$$

$$T \sin \alpha = F_k. \quad (2)$$

Розділимо (1) на (2): $\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_k}{mg}$, $\operatorname{tg} \alpha \approx \sin \alpha = \frac{r}{2l}$.

Оскільки кут α малий, то: $\frac{r}{2l} = \frac{kq^2}{r^2 mg} \Leftrightarrow q = r \sqrt{\frac{rmg}{2kl}}$,

$$q = 0,1 \sqrt{\frac{0,1 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 9,8}{2 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 0,5}} = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ Кл.}$$

Відповідь: $2,1 \cdot 10^{-4}$ Кл.

3. Два однакових позитивних заряди 10^{-7} Кл розміщені в повітрі на відстані 8 см один від одного. Визначити напруженість поля в точці О, що лежить на середині відрізка, який сполучає заряди, і в точці А, розміщеній на відстані 5 см від зарядів.

Розв'язання

Дано

$$Q_1 = Q_2 = 10^{-7} \text{ Кл}$$

$$\varepsilon = 1, 2r = 0,08 \text{ м}$$

$$r_1 = 0,05 \text{ м}$$

$$E_O = ? \quad E_A = ?$$

За правилом суперпозиції

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

В точці О вектори направлені в протилежні сторони, крім того заряди однакові і розміщені на однаковій відстані від точки О.

$$E_0 = E_{10} - E_{20} = 0, \quad E_{10} = E_{20}.$$

В точці А результируючий вектор напруженості E_A є діагоналлю паралелограма, утвореного E_1 і E_2 .

Отже, $E_A = 2E_1 \cos \alpha$. Оскільки

$$\cos \alpha = \frac{h}{r_1}, \text{ а } h = \sqrt{r_1^2 - r^2} = 0,03 \text{ м,}$$

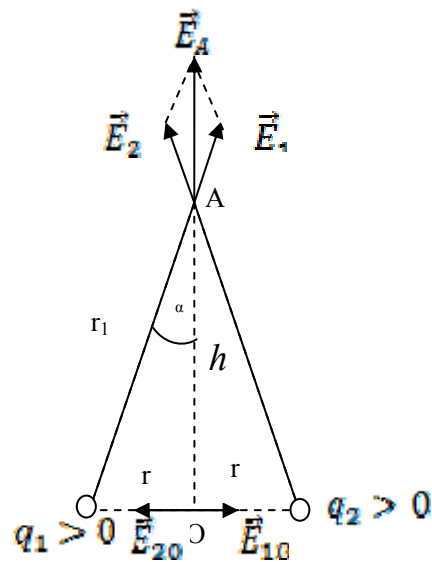
тоді в точці А напруженість буде визначатись:

$$E_A = 2 \frac{Q_1}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_1^2} \cdot \frac{h}{r_1}.$$

Звідки

$$E_A = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot 0,03}{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,05^3} = 4,32 \cdot 10^5 \text{ В/м.}$$

Відповідь: $E_0 = 0$, $E_A = 4,32 \cdot 10^5$ В/м.



4. Якої маси повинна бути порошина, щоб перебувати в полі плоского конденсатора в стані рівноваги, якщо напруженість поля $15 \cdot 10^4$ В/м, а на порошині знаходиться 2062 електронів?

Розв'язання

<p>Дано $E = 15 \cdot 10^4$ В/м $n = 2062$ $m - ?$</p>	<p>Оскільки порошина перебуває в стані рівноваги в електричному полі плоского конденсатора, то сума всіх сил, які діють на неї, повинна дорівнювати нулю.</p>
--	---

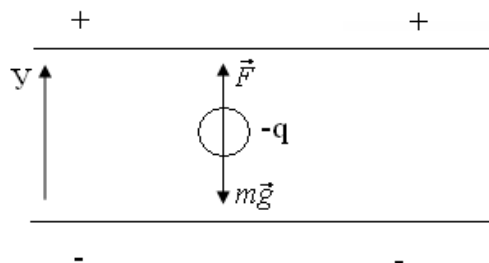
$$\vec{F} + m\vec{g} = 0,$$

$$qE - mg = 0, \quad qE = mg,$$

$$m = \frac{qE}{g} = \frac{neE}{g},$$

$$m = \frac{2062 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 15 \cdot 10^4}{9,8} = 5 \cdot 10^{-12} \text{ кг.}$$

Відповідь: $5 \cdot 10^{-12}$ кг.



Задачі для самостійного розв'язання

1. Визначити силу взаємодії між електроном і протоном у атомі водню. Радіус електронної орбіталі приблизно дорівнює $5,3 \cdot 10^{-9}$ см.

Відповідь: $81 \cdot 10^{-9}$ Н.

2. Дві кульки розташовані на відстані 10 см одна від одної, мають однакові негативні заряди і взаємодіють із силою 0,23 Н. Визначити кількість «надлишкових» електронів на кожній кульці.

Відповідь: 10^{11} .

3. З якою силою діють два однакові однойменні заряди на третій заряд, вміщений посередині між ними?

Відповідь: 0.

4. Заряди 90 і 10 нКл розташовані на відстані 4 см один від одного. Де треба розмістити третій заряд, щоб він перебував у рівновазі?

Відповідь: 1 см від меншого і 3 см від більшого.

5. У вершині рівностороннього трикутника містяться однакові заряди величиною $21 \cdot 10^{-6}$ Кл кожний. Який заряд треба помістити в центр трикутника, щоб уся система була в рівновазі?

Відповідь: $-12,18 \cdot 10^{-6}$ Кл.

6. Заряди по 0,1 мкКл розташували на відстані 6 см один від одного. Визначити напруженість поля в точці, віддаленій на 5 см від кожного із зарядів. Розв'язати задачу для випадків:

а) обидва заряди позитивні;

б) один заряд позитивний, другий негативний.

Відповідь: а) 576 кВ/м, б) 432 кВ/м.

7. У простір між двома паралельними пластинами з різницею потенціалів 8000 В паралельно пластинам влітає електрон і вилітає з нього за $1 \cdot 10^{-9}$ с. Якого відхилення зазнає електрон за цей час, якщо відстань між пластинами 4 см?

Відповідь: 0,018 м.

8. При якій прискорювальній напрузі швидкість електронів досягає 0,1 швидкості світла у вакуумі? Вважати, що початкова швидкість електрона рівна нулю.

Відповідь: 2560 В.

3.1.2 Робота, потенціал. Різниця потенціалів

Сили, які діють в електричному полі, – *центральні*. Поле центральних сил – *потенціальне*. Під час переміщення тіла із зарядом q на відстань S у електричному полі напруженістю E під дією сили F виконується робота:

$$A = FSC \cos \alpha = qESC \cos \alpha ,$$

де α – кут між векторами \vec{E} і \vec{S} .

Робота сил електричного поля при переміщенні заряду не залежить від форми шляху, а залежить тільки від взаємного розміщення початкової і кінцевої точок траєкторії.

Потенціальна енергія заряду в однорідному електричному полі пов'язана з напруженістю поля співвідношенням:

$$W_n = -qEx ,$$

де x – координати заряду, що $W = 0$ при $x = 0$.

Тоді робота:

$$A = W_{n1} - W_{n2} = qE_2x_2 - qE_1x_1 .$$

Величину, яка визначається відношенням потенціальної енергії заряду до величини цього заряду, називають *потенціалом*.

$$\varphi = \frac{W_n}{q} .$$

Потенціал чисельно дорівнює роботі кулонівських сил з переміщенням одиничного позитивного заряду із даної точки простору в нескінченність:

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

Потенціал поля – величина скалярна. Під час переміщення одиничного заряду з точки А в точку В виконується робота:

$$\varphi_A - \varphi_B = \frac{A}{q},$$

де $U = \varphi_A - \varphi_B$ - різниця потенціалів між точками А і В.

Вимірюють в СІ $[\varphi] = \text{Дж/Кл} = \text{В}$.

Поверхні, потенціали всіх точок яких однакові, називають екіпотенціальними поверхнями. В кожній точці екіпотенціальної поверхні вектор напруженості \vec{E} перпендикулярний до неї.

Якщо електричне поле утворене кількома зарядами, то потенціал в будь-якій точці поля дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів, створених кожним зарядом :

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_i.$$

Потенціал поля точкового заряду q на відстані r від нього:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}.$$

3.1.3 Електроємність. Конденсатори

Електроємністю (ємністю) – провідника C називають величину, що дорівнює відношенню заряду q , наданого провіднику до його потенціалу :

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$

Одиниця електричної ємності в СІ – фарад, $[C] = \text{Кл/В} = \text{Ф}$.

Система з двох провідників, розділених шаром діелектрика, товщина якого мала порівняно з розмірами провідників, називається конденсатором. Конденсатори бувають плоскі, циліндричні, сферичні.

Електроємність плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d},$$

де S – площа пластини,

d – відстань між пластинами,

ϵ – діелектрична проникність діелектрика.

Ємність конденсатора з n пластин:

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S(n-1)}{d}.$$

Конденсатори з'єднують у батареї паралельно або послідовно.

1. Паралельне з'єднання (рис. 31).

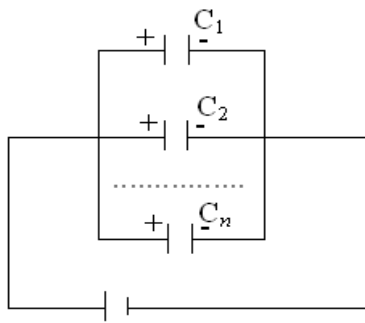


Рисунок 31

Напруги на всіх конденсаторах однакові:

$$U_1 = U_2 = \dots = U_n,$$

$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_n,$$

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

2. Послідовне з'єднання (рис. 32).

Заряди усіх конденсаторів при послідовному їх з'єднанні однакові.

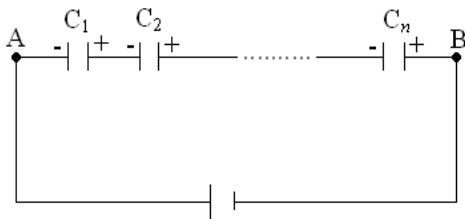


Рисунок 32

$$U = \frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \dots + \frac{q}{C_n}.$$

Загальна ємність:

$$\frac{1}{C_{\text{посл}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}.$$

Потенціальна енергія зарядженого конденсатора:

$$W_n = \frac{q(\varphi_1 - \varphi_2)}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{C(\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2} = \frac{CU^2}{2}.$$

Для плоского конденсатора:

$$W_n = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2 Sd}{2}.$$

Густина енергії електричного поля:

$$\omega = \frac{W_n}{V} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}.$$

Приклади розв'язування задач

1. В однорідному електричному полі, напруженість якого 1 кВ/м, перемістили на 2 см в напрямі силової лінії заряд – 25 нКл. Визначити роботу поля, зміну потенціальної енергії взаємодії заряду з полем і різницю потенціалів між початковою і кінцевою точками переміщення.

Дано

$$E = 1000 \text{ В/м}$$

$$l = 0,02 \text{ м}$$

$$Q = -25 \text{ нКл}$$

$$A - ? \quad U - ? \quad \Delta W_n - ?$$

Розв'язання

Заряд переміщують вздовж силових ліній, то

$$A = qEl = (-2,5 \cdot 10^{-9}) \cdot 1000 \cdot 0,02 = -0,5 \cdot 10^{-6} \text{ Дж.}$$

Врахувавши, що

$$A = -\Delta W_n, \text{ то } \Delta W_n = -A = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ Дж},$$

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU \text{ то } U = \frac{A}{q} = El,$$

$$U = 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-2} = 20 \text{ В}.$$

Відповідь: -0,5 мкДж; 0,5 мкДж; 20 В.

2. Електрон вилітає з точки, потенціал якої 300 В, із швидкістю $0,6 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ у напрямі силових ліній поля. Визначити потенціал точки поля, у якій швидкість електрона дорівнюватиме нулю.

Розв'язання

Дано

$$\varphi_1 = 300 \text{ В}$$

$$g_1 = 0,6 \cdot 10^7 \text{ м/с}$$

$$g_2 = 0$$

$$\varphi_2 = ?$$

Робота електричного поля із переміщення заряду (електрона):

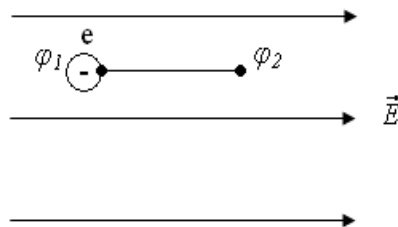
$$A = -q_e(\varphi_2 - \varphi_1).$$

З іншого боку (теорема про кінетичну енергію):

$$A = \Delta W_k = \frac{m g_2^2}{2} - \frac{m g_1^2}{2},$$

$$-q_e(\varphi_2 - \varphi_1) = \frac{m g_2^2}{2} - \frac{m g_1^2}{2},$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \frac{-m(g_2^2 - g_1^2)}{2q_e}.$$



Оскільки

$$g_2 = 0, \text{ то } \varphi_2 = \varphi_1 + \frac{m g_1^2}{2q_e}.$$

$$\text{Обчислення: } \varphi_2 = 300 + \frac{9,1 \cdot 10^{-31} (0,6 \cdot 10^7)^2}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 198 \text{ В}.$$

Відповідь: 198 В.

3. Ємність плоского повітряного конденсатора $C = 10^{-9} \text{ Ф}$, відстань між пластинами 4 мм. На заряд $Q = 4,9 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$, розміщений між пластинами конденсатора, діє сила $F = 9,8 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$. Площа пластини конденсатора 100 см^2 . Визначити: 1) напруженість поля і різницю потенціалів між пластинами; 2) густину енергії і енергію поля конденсатора.

Розв'язання

Дано

$$F = 9,8 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$$

$$Q = 4,9 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$C = 10^{-9} \text{ Ф}$$

$$S = 10^{-2} \text{ м}^2$$

$$d = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$E = ? \quad U = ? \quad W_n = ? \quad \omega = ?$$

Поле між пластинами конденсатора вважаємо однорідним. Напруженість поля E можна визначити з виразу $E = F/q$,

$$E = \frac{9,8 \cdot 10^{-5}}{4,9 \cdot 10^{-9}} = 2 \cdot 10^4 \text{ В/м}.$$

Різниця потенціалів між пластинами:

$$U = Ed = 2 \cdot 10^4 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 80 \text{ В}.$$

Енергія конденсатора:

$$W_n = \frac{CU^2}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 SU^2}{2d},$$

$$W_n = \frac{1,885 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-2} \cdot (8 \cdot 10)^2}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 7 \cdot 10^{-8} \text{ Дж},$$

$$\omega = \frac{W_n}{V} = \frac{W_n}{Sd} = \frac{7 \cdot 10^{-8}}{10^{-2} \cdot 4 \cdot 10^{-3}} = 1,75 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/м}^3.$$

Відповідь: $E = 2 \cdot 10^4$ В/м, $U = 80$ В, $W_n = 7,04 \cdot 10^{-8}$ Дж, $\omega = 1,75 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³.

4. Плоский конденсатор, площа пластин якого S , а відстань між ними d , має ізолятор із скляної пластини. Конденсатор зарядили до напруги U , після чого від'єднали від джерела напруги. Визначити механічну роботу, яку треба виконати, щоб вийняти скляну пластину з конденсатора. Тертям і вагою пластини знехтувати.

Розв'язання

Дано S, d, U, ε $A - ?$	Шукана робота A дорівнює зміні енергії зарядженого конденсатора.
---	--

$$A = W_2 - W_1,$$

$$W = \frac{CU^2}{2}, \text{ де } C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}, \text{ то } W_1 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 SU^2}{2d}.$$

Після видалення пластинки діелектриком буде повітря. Це означає зменшення діелектричної проникності в ε разів і, як наслідок, збільшення напруженості в ε разів.

Тоді напруга збільшиться в ε разів:

$$U = Ed, \quad W_2 = \frac{\varepsilon_0 S (\varepsilon U)^2}{2d},$$

$$A = \frac{\varepsilon^2 \varepsilon_0 SU^2}{2d} - \frac{\varepsilon \varepsilon_0 SU^2}{2d} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 (\varepsilon - 1) SU^2}{2d}.$$

Відповідь: $A = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 (\varepsilon - 1) SU^2}{2d}$.

Задачі для самостійного розв'язання

1. Електрон перемістився в прискорювальному полі з точки, потенціал якої 200 В, у точку з потенціалом 300 В. Визначити кінетичну енергію електрона, зміну потенціальної енергії взаємодії з полем і набуту швидкість. Початкова швидкість дорівнює нулю.

Відповідь: $1,6 \cdot 10^{-17}$ Дж; $-1,6 \cdot 10^{-17}$ Дж; 5,9 Мм/с.

2. У деяких двох точках поля точкового заряду напруженість відрізняється в 4 рази. У скільки разів відрізняються потенціали поля в цих точках?

Відповідь: у 2 рази.

3. Сто однакових крапель ртуті, які заряджені до потенціалу $\varphi_0 = 20$ В, зливаються в одну велику краплину. Який потенціал краплі, що утворилася?

Відповідь: 432 В.

4. Конденсатор складається з двох розділених пластин площею 100 см^2 кожна. Коли одній з них надали заряд $6 \cdot 10^{-19}$ Кл, виникла напруга 120 В. На якій відстані одна від одної розміщені пластини?

Відповідь: $1,7 \cdot 10^{-3}$ м.

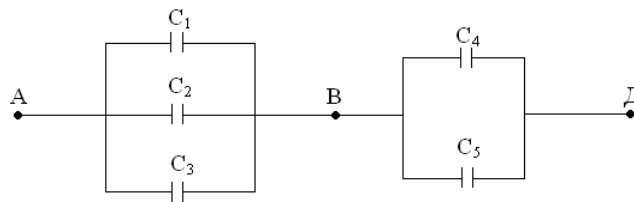
5. Конденсатор у 50 мкФ , заряджений до потенціалу 600 В, з'єднали паралельно з незарядженим конденсатором ємністю 100 мкФ . Яка встановиться напруга на конденсаторах?

Відповідь: 200 В.

6. Конденсатори з ємностями 1 мкФ і 4 мкФ з'єднали послідовно і подали на батарею напругу 450 В. Визначити ємність батареї і напругу на кожному конденсаторі.

Відповідь: $0,8 \text{ мкФ}$; 360 В; 90 В.

7. Знайти напругу на клеммах кола між точками А і Д та загальну ємність п'яти конденсаторів, увімкнутих за схемою, якщо $C_1 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$, $C_2 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$, $C_3 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$, $C_4 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$, $C_5 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$. Напруга між точками А і В - 100 В.



Відповідь: 300 В, $4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$.

3.1.4 Електричний струм. Закони постійного струму

Впорядкований рух (напрявлений) заряджених частинок називається *електричним струмом*. Носіями зарядів можуть бути вільні електрони (електронна провідність) або іони різного знаку (іонна провідність). Кількісною характеристикою струму є його сила I і густина j .

Силою струму називають скалярну величину, що дорівнює відношенню кількості заряду Δq , що переноситься за одиницю часу через поперечний переріз провідника:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}.$$

Одиниця сили струму в СІ – ампер – $[I] = \text{А}$.

Постійний струм – це струм, сила і напрям якого не змінюється. Для постійного струму:

$$I = \frac{Q}{t}.$$

Густина струму – векторна фізична величина. Її модуль дорівнює відношенню сили струму I до площі поперечного перерізу провідника S :

$$j = \frac{I}{S}.$$

Вектор \vec{j} напрямлений уздовж напрямку струму.

Технічним напрямом струму вважається напрям руху позитивних зарядів (рис. 33). Умовою існування електричного струму є наявність вільних заряджених частинок та електричного поля в провіднику, яке діє на ці частинки із силою $\vec{F} = q\vec{E}$ і зумовлює їхній упорядкований рух.

Щоб у провіднику весь час проходив струм, необхідно підтримувати в ньому постійне електричне поле. Для переміщення заряду q по деякій ділянці провідника необхідно виконати певну роботу A . Напряга на даній ділянці чисельно дорівнює роботі по переміщенню одиничного заряду:

$$U = \frac{A}{q}.$$

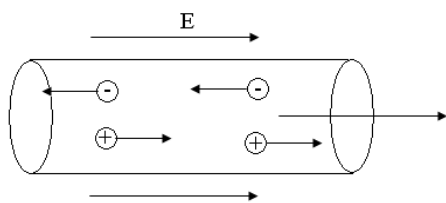


Рисунок 33

Щоб підтримувати струм, потрібно весь час поновлювати заряди з'єднаних тіл. Це можливо завдяки існуванню сторонніх сил. Характеризує сторонні сили фізична величина, що називається електрорушійною силою (ЕРС).

ЕРС дорівнює роботі сторонніх сил із переміщення одиничного позитивного заряду в замкнутому електричному полі:

$$\varepsilon = \frac{A_{стор}}{q}.$$

Одиниця ЕРС і напруги в СІ – вольт – $[U] = \text{Дж/Кл} = \text{В}$.

Для кожного провідника існує залежність між силою струму в провіднику і напругою, прикладеною до його кінців.

Г. Ом експериментально встановив: на ділянці однорідного кола сила струму прямо пропорційна прикладеній напрузі U і обернено пропорційна опорю ділянки R (закон Ома):

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

де R – опір ділянки.

Електричний опір зумовлений тим, що електрони в процесі руху взаємодіють з позитивними іонами кристалічної решітки металу.

Опір провідника залежить від його довжини l , площі поперечного перерізу S і властивостей матеріалу:

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

де ρ – питомий опір провідника, довжина якого 1м,

S - площа поперечного перерізу 1м^2 : $\rho = \frac{RS}{l}$.

Питома електропровідність:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}.$$

При підвищенні температури частішають співудари електронів з іонами, тому опір провідників залежить від температури:

$$R = R_0(1 + \alpha t),$$

де R_0 – опір при 0°C ,

t – температура,

α – температурний коефіцієнт опору, який характеризує відносну зміну опору при нагріванні його на 1 К.

$$\alpha = \frac{R - R_0}{R_0 t}.$$

Для багатьох металів (чистих): $\alpha \approx \frac{1}{273} \text{K}^{-1}$.

У зовнішньому колі, що має зовнішній опір R , джерело струму з ЕРС ε і внутрішнім опором r , сила струму дорівнює відношенню ЕРС до повного опору кола:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} \text{ - закон Ома для повного кола.}$$

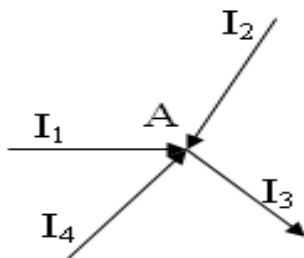


Рисунок 34

У загальному випадку на практиці часто доводиться розраховувати складні розгалужені електричні кола, які містять вузли. Вузлом А (рис. 34) у розгалуженому колі називають точку, в якій збігається не менше трьох провідників.

Німецький вчений Г. Р. Кірхгоф встановив закони, за допомогою яких

проводять розрахунки струмів і напруг у розгалужених колах.

Перше правило Кірхгофа

Алгебраїчна сума струмів, які збігаються у вузлі, дорівнює нулю.

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0 \text{ або } I_1 + I_2 + \dots + I_n = I.$$

Друге правило Кірхгофа

У будь-якому замкненому контурі розгалуженого кола алгебраїчна сума ЕРС дорівнює алгебраїчній сумі добутків струмів на опори відповідних ділянок цього контуру:

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i, \text{ або } I_1 R_1 + I_2 R_2 + \dots + I_n R_n = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n.$$

Із законів Кірхгофа випливає: опір кола з послідовно з'єднаними провідниками дорівнює сумі опорів окремих провідників (рис.35):

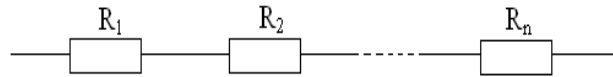


Рисунок 35

$$R_{\text{носл}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n,$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n = \text{const},$$

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n,$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

При паралельному з'єднанні провідників (рис.36):

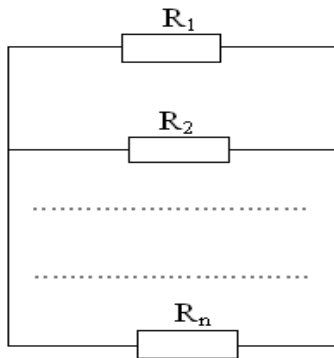


Рисунок 36

$$\frac{1}{R_{\text{нар}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n},$$

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n,$$

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n,$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Для зменшення опору кола в n разів паралельно до нього приєднують провідник малого опору (шунт):

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_0}{n-1}.$$

Для вимірювання сили струму амперметр вмикають в коло послідовно із споживачем.

Для вимірювання напруги вольтметр вмикають в коло паралельно споживачеві.

Приклади розв'язування задач

1. Визначити опір 17,6 кг нікелінового дроту діаметром 2 мм.

Дано

$$\rho = 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$m = 17,6 \text{ кг}$$

$$\rho_{\text{гус}} = 8800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$D = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

R -?

Розв'язання

Опір нікелінового дроту визначимо за формулою:

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

Щоб скористатись цією формулою, потрібно знайти довжину і переріз дроту.

Довжину знаходимо з об'єму, який визначаємо за формулою густини:

$$\rho_{\text{гус}} = \frac{m}{V},$$

$$V = \frac{m}{\rho_{\text{гус}}},$$

$$S = \frac{\pi D^2}{4},$$

$$V = l \cdot S, \quad l = \frac{V}{S}.$$

$$\text{Тоді } R = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{V}{S^2} = \rho \frac{16m}{\rho_{\text{гус}} \pi^2 D^4}.$$

Підставивши числові значення, отримаємо:

$$R = \frac{0,4 \cdot 10^{-6} \cdot 16 \cdot 17,6}{8800 \cdot 3,14^2 \cdot (2 \cdot 20^{-3})^4} = 80 \text{ Ом.}$$

Відповідь: $R = 80 \text{ Ом}$.

2. Якої довжини при 20°C треба взяти нікеліновий провідник діаметром $0,4 \text{ мм}$, щоб виготовити нагрівальний прилад, який при температурі 820°C має опір?

Дано

$$D = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

$$T_1 = 293 \text{ К}$$

$$T_2 = 1093 \text{ К}$$

$$\alpha = 0,0003 \text{ К}^{-1}$$

$$\rho = 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$R_2 = 49,6 \text{ Ом}$$

$$l = ?$$

Розв'язання

Довжина провідника входить в формулу $R_1 = \rho \frac{l}{S}$,

а опір пов'язаний із зміною температури, тому для знаходження довжини нікелінового дроту потрібно використати формулу залежності опору від температури:

$$l = \frac{R_1 S}{\rho}, \quad S = \frac{\pi D^2}{4},$$

$$R_1 = \frac{R_2}{1 + \alpha(T_2 - T_1)}.$$

$$\text{Тоді } l = \frac{\pi D^2 R_2}{4 \rho (1 + \alpha(T_2 - T_1))}.$$

Підставивши числові значення, отримаємо:

$$l = \frac{3,14 \cdot 0,16 \cdot 10^{-6} \cdot 49,6}{4 \cdot 0,4 \cdot 10^{-4} (1 + 0,0003(1093 - 293))} = 12,56 \text{ м.}$$

Відповідь: $12,56 \text{ м}$

3. Яка кількість електронів проходить через поперечний переріз провідника площею 1 мм^2 за 2 хв , якщо густина струму в провіднику 150 А/см^2 ?

Дано

$$S = 10^{-6} \text{ м}^2$$

$$t = 120 \text{ с}$$

$$j = 150 \frac{\text{А}}{\text{см}^2} =$$

$$= 150 \cdot 10^4 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$n - ?$$

Розв'язання

Кількість електронів, які проходять через поперечний переріз провідника, можна визначити як

$$n = \frac{Q}{e}$$

За час t через переріз провідника при струмі $I = j \cdot S$ проходить заряд

$$Q = j \cdot S \cdot t$$

Отже, $n = \frac{j \cdot S \cdot t}{e}$.

Підставивши числові значення, отримаємо: $n = \frac{j \cdot S \cdot t}{e}$.

$$n = \frac{150 \cdot 10^4 \cdot 10^{-6} \cdot 120}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,15 \cdot 10^{21}$$

Відповідь: $1,15 \cdot 10^{21}$.

4. Визначити струм короткого замикання батареї, ЕРС якої 15 В, якщо при під'єднанні до неї опору 3 Ом струм у колі становить 4 А.

Дано

$$\varepsilon = 15 \text{ В}$$

$$R = 3 \text{ Ом}$$

$$I = 4 \text{ Ом}$$

$$I_{\text{кз}} - ?$$

Розв'язання

Струм короткого замикання визначимо за формулою:

$$I_{\text{кз}} = \frac{\varepsilon}{r}$$

де r – внутрішній опір батареї, який визначаємо із закону

Ома для повного кола: $r = \frac{\varepsilon - IR}{I}$, $I_{\text{кз}} = \frac{\varepsilon}{\frac{\varepsilon - IR}{I}} = \frac{\varepsilon I}{\varepsilon - IR}$.

Підставивши числові значення, отримаємо: $I_{\text{кз}} = \frac{15 \cdot 4}{15 - 4 \cdot 3} = 20 \text{ А}$.

Відповідь: 20 А.

5. Електричне коло складається з трьох послідовно з'єднаних провідників і джерела струму напругою 24 В. Опір першого провідника 4 Ом, другого 6 Ом, напруга на кінцях третього провідника 4 В. Знайти силу струму в колі, опір третього провідника і напругу на кінцях першого і другого провідників.

Розв'язання

Дано

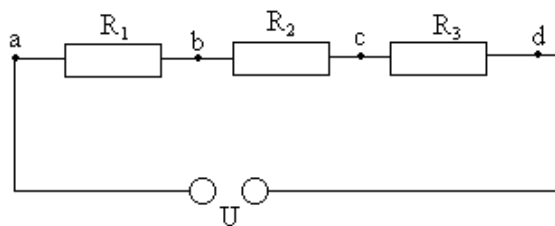
$$U = 24 \text{ В}$$

$$U_3 = 4 \text{ В}$$

$$R_1 = 4 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 6 \text{ Ом}$$

$$R_3 - ? \quad U_1 - ? \quad U_2 - ?$$



При послідовному з'єднанні: $U=U_1+U_2+U_3$, $U_1+U_2=U-U_3$.

Закон Ома для ділянки кола ас: $I = \frac{U_{AC}}{R_{AC}} = \frac{U_1 + U_2}{R_1 + R_2} = \frac{U - U_3}{R_1 + R_2}$.

Обчислимо: $I = \frac{24-4}{4+6} = 2 \text{ А}$,

$U_1 = IR_1 = 2 \cdot 4 = 8 \text{ В}$, $U_2 = IR_2 = 2 \cdot 6 = 12 \text{ В}$, $R_3 = \frac{U_3}{I} = \frac{4}{2} = 2 \text{ Ом}$.

Відповідь: $I = 2 \text{ А}$, $U_1 = 8 \text{ В}$, $U_2 = 12 \text{ В}$, $R_3 = 2 \text{ Ом}$.

Задачі для самостійного розв'язання

1. Яка напруженість електричного поля всередині ніхромового провідника площею поперечного перерізу $1,1 \text{ мм}^2$, якщо сила струму в ньому 1 А ?

Відповідь: $E = 1 \text{ В/м}$.

2. По ввімкнутому в коло провіднику йде струм силою в 5 мкА . Яка кількість електричних зарядів проходить через провідник протягом однієї години?

Відповідь: $q = 0,018 \text{ Кл}$.

3. Якої довжини треба взяти залізний дріт перерізом 2 мм^2 , щоб його опір був таким самим, як опір 10^{-3} м алюмінієвого дроту з поперечним перерізом $4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$?

Відповідь: $0,47 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

4. По залізному дроті діаметром $1,5 \text{ мм}$ і завдовжки $14,2 \text{ м}$ іде струм, $2,25 \text{ А}$, напруга на кінцях дроту $1,8 \text{ В}$. Який питомий опір залізного дроту?

Відповідь: $0,099 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

5. Мідний провідник опором 10 Ом розрізали на 5 однакових частин і ці частини скрутили в трос. Визначити опір троса.

Відповідь: $0,4 \text{ Ом}$.

6. У мережу 220 В послідовно ввімкнули дві лампи. Яка напруга припадає на кожну лампу, якщо: а) опір їх однаковий, б) опір першої лампи в 2 рази більший, ніж другої?

Відповідь: 110 В , $73,3 \text{ В}$, $146,6 \text{ В}$.

7. При замиканні елемента на опір $4,5 \text{ Ом}$ струм у колі дорівнює $0,2 \text{ А}$, а при замиканні того самого елемента на опір 10 Ом струм у колі дорівнює $0,1 \text{ А}$. Знайти ЕРС елемента і його внутрішній опір.

Відповідь: $1,1 \text{ В}$, 1 Ом .

8. Визначити струм короткого замикання джерела з ЕРС 12 В , якщо при з'єднанні його з опором 2 Ом струм в колі буде 5 А .

Відповідь: 30 А .

9. Батерея з ЕРС 6 В і внутрішнім опором $1,5 \text{ Ом}$ живить зовнішнє коло, що складається з двох паралельно з'єднаних опорів 2 і 8 Ом . Визначити напругу на клеммах батареї і силу струму на опорах.

Відповідь: $3,2 \text{ В}$, $1,6 \text{ А}$, $0,4 \text{ А}$.

10. ЕРС акумулятора 2 В, його внутрішній опір 0,4 Ом, опір зовнішнього кола 1 Ом. Визначити напругу на клеммах акумулятора.
Відповідь: 1,4 В.

3.1.5 Робота і потужність електричного струму. Закон Джоуля-Ленца

Роботу, яку виконує джерело струму з ЕРС, визначають за формулою:
$$A = \varepsilon I t.$$

Енергія джерела струму перетворюється частково або повністю у внутрішню енергію провідника або в механічну енергію. Skorиставшись законом Ома, роботу можна виразити через силу струму або напругу:

$$A = I^2 R t, \quad A = \frac{U^2}{R} t.$$

Потужність електричного струму дорівнює відношенню роботи A до часу t , протягом якого вона виконується:

$$P = \frac{A}{t} = IU.$$

Одиницею потужності в СІ є Ват (Вт).

Якщо по провіднику проходить струм, то провідник нагрівається. Англійський вчений Дж. П. Джоуль і російський вчений Е. Х. Ленц встановили закон (Джоуля–Ленца): кількість теплоти, що виділяється в провіднику зі струмом, пропорційна силі струму, напрузі і часу проходження струму:

$$Q = I U t = I^2 R t,$$

При відсутності сторонніх сил:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = IR, \quad A = Q = I U t = I^2 R t = \frac{U^2 t}{R},$$

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

Приклади розв'язування задач

1. Напруга на зварювальній машині 60 В, сила струму 120 А. Визначити опір дуги, потужність струму.

<p>Дано</p> <p>$I = 120 \text{ А,}$</p> <p>$U = 60 \text{ В}$</p> <p>$P - ?$</p>	<p style="text-align: center;"><i>Розв'язання</i></p> <p>Використаємо закон Ома для ділянки кола і формулу потужності: $R = \frac{U}{I}, P = IU.$</p> <p>Підставивши числові значення, отримаємо:</p> $R = \frac{60}{120} = 0,5 \text{ Ом; } P = 120 \cdot 60 = 7200 \text{ Вт.}$
---	--

Відповідь: $R = 0,5 \text{ Ом}$; $P = 7,2 \text{ кВт}$.

2. Електрокип'ятильник, опір спіралі якого 160 Ом , помістили в посудину з $0,5 \text{ л}$ води при 20°C і увімкнули в мережу напругою 220 В . Через 20 хв кип'ятильник вимкнули. Яка кількість води википіла, якщо ККД електрокип'ятильника 80% ?

Дано

$$\eta = 80\% = 0,8$$

$$R = 160 \text{ Ом}$$

$$V = 0,5 \text{ л}$$

$$\rho = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$m = 0,5 \text{ кг}$$

$$T_1 = 293^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 373^\circ\text{C}$$

$$U = 220 \text{ В}$$

$$t = 20 \text{ хв} = 1200 \text{ с}$$

$$c = 4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$$

$$L = 2,3 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$$m_1 - ?$$

Розв'язання

ККД η кип'ятильника знаходимо за формулою:

$$\eta = \frac{Q_k}{Q_3} \cdot 100\%$$

Кількість корисної теплоти йде на нагрівання води від температури T_1 до температури T_2 і на перетворення деякої частини води m_1 в пару:

$$Q_{12} = cm(T_2 - T_1) + Lm_1.$$

А загальна кількість теплоти, що виділяється під час роботи електрокип'ятильника:

$$Q_3 = \frac{U^2}{R} \cdot t.$$

Отже, $\eta = \frac{cm(T_2 - T_1) + Lm_1}{U^2 \cdot t} \cdot R$, звідси:

$$m_1 = \frac{\eta U^2 t - cm(T_2 - T_1)R}{L \cdot R}.$$

Підставивши числові значення, отримаємо:

$$m_1 = \frac{0,8 \cdot 220^2 \cdot 1200 - 4,2 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot (373 - 293) \cdot 160}{2,3 \cdot 10^6 \cdot 160} = 5,3 \cdot 10^{-2} \text{ кг}.$$

Відповідь: 53 мг .

3. Знайти внутрішній опір і ЕРС джерела струму, якщо при силі струму в зовнішній частині кола 30 А потужність дорівнює 180 Вт , а при силі струму 10 А – 100 Вт .

Дано

$$I_1 = 30 \text{ А}, I_2 = 10 \text{ А}$$

$$P_1 = 180 \text{ Вт}, P_2 = 100 \text{ Вт}$$

$$r - ?, E - ?$$

Розв'язання

Для визначення сили струму в обох випадках використаємо закон Ома для повного кола:

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + r}, \quad I_2 = \frac{E}{R_2 + r}.$$

Опори R_1 та R_2 знайдем з формул для потужності:

$$P_1 = I_1^2 R_1 \Rightarrow R_1 = \frac{P_1}{I_1^2}, \quad P_2 = I_2^2 R_2 \Rightarrow R_2 = \frac{P_2}{I_2^2}.$$

Виключивши ЕРС, отримаємо: $E = I_1 R_1 + I_1 r$, $E = I_2 R_2 + I_2 r$.

$$\text{Отже: } I_1 R_1 + I_1 r = I_2 R_2 + I_2 r \Rightarrow r = \frac{I_1 R_1 - I_2 R_2}{I_2 - I_1} = \frac{I_1 \frac{P_1}{I_1^2} - I_2 \frac{P_2}{I_2^2}}{I_2 - I_1}.$$

$$\text{Обчислимо: } r = \frac{180}{10} - \frac{100}{30} = 0,2 \text{ Ом, а ЕРС:}$$

$$E = I_1 R_1 + I_1 r = 30(0,2 + 0,2) = 12 \text{ В.}$$

Відповідь: $r = 0,2 \text{ Ом}$, $E = 12 \text{ В}$.

4. Сталевий провідник завдовжки 100 м увімкнули на 10 с у джерело постійного струму напругою 100 В. На скільки градусів нагрівається провідник?

Дано

$$l = 100 \text{ м, } U = 100 \text{ В}$$

$$t = 10 \text{ с, } c = 0,46 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\rho_{\text{ст}} = 7,8 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\rho = 0,12 \cdot 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$\Delta T - ?$$

Розв'язання

Нагрівання провідника відбувається за рахунок теплоти, що виділяється при проходженні струму. Ця теплота визначається за законом Джоуля-Ленца:

$Q = \frac{U^2 t}{R}$. А кількість теплоти, яка йде на нагрівання провідника:

$$Q = cm\Delta T. \text{ Тоді}$$

$$\frac{U^2 t}{R} = cm\Delta T.$$

Масу і опір визначимо:

$$m = \rho_{\text{ст}} V = \rho_{\text{ст}} l S, \quad R = \rho \frac{l}{S}.$$

Підставивши, отримаємо остаточний вираз:

$$\frac{U^2 S t}{\rho l} = c \rho_{\text{ст}} l S \Delta T,$$

$$\Delta T = \frac{U^2 t}{\rho l c \rho_{\text{ст}}}.$$

Підставивши числові значення, отримаємо:

$$\Delta T = \frac{100^2 \cdot 10}{0,12 \cdot 10^6 \cdot 100 \cdot 0,46 \cdot 10^3 \cdot 7,8 \cdot 10^3} = 23 \text{ К.}$$

Відповідь: $\Delta T = 23 \text{ К}$.

Задачі для самостійного розв'язання

1. Потужна електролампа ввімкнута у мережу з напругою 200 В, має опір 48,3 Ом. Яка її потужність і скільки теплоти виділить лампа за три години?

Відповідь: $108 \cdot 10^5$ Дж.

2. Скільки витків нікелінового дроту треба намотати на фарфоровий циліндр діаметром 0,016 м, щоб зробити кип'ятильник, у якому протягом 20 хв закипить 1,2 кг води з початковою температурою 10°C, ККД 60%? Діаметр дроту $0,2 \cdot 10^{-3}$ м. Напруга 100 В.

Відповідь: 25 витків.

3. Проводку до будинку зроблено проводом з опором 0,5 Ом. Напруга на лінії постійна і дорівнює 127 В. Яка максимально допустима потужність, що споживається, якщо напруга на ввімкнутих приладах не повинна падати нижче 120 В?

Відповідь: 1680 Вт.

4. Для нагрівання 4,5 кг води від 20°C до 100°C нагрівник споживає 0,5 кВт·год електроенергії. Визначити ККД нагрівника.

Відповідь: 84%.

5. В електродвигуні трамвайного вагона проходить струм 110 А при напрузі 600 В. Визначити швидкість руху вагона на горизонтальному відрізку шляху, якщо двигун створює силу тяги 3000 Н, ККД 60%.

Відповідь: 13,2 м/с.

6. До кінців свинцевого дроту завдовжки 1 м прикладено напругу 10 В. Скільки часу мине від початку пропускання струму до моменту плавлення свинцю? Початкова температура свинцю 27°C.

Відповідь: 1 с.

7. На електроплитці з ККД 60%, увімкнутій у коло з напругою 220 В, за 10 хв можна нагріти 600 г води від 20°C до 100°C. Який опір підвідного шнура електроплитки, якщо відомо, що спад напруги на ньому 1 В?

Відповідь: 0,4 Ом.

3.1.6 Електричний струм у різних середовищах

В різних середовищах носіями електричного струму є заряджені частинки.

Електричний струм у металах

Метали. Носіями струму в металах є вільні електрони. Електрони розміщені на зовнішній оболонці, слабо зв'язані з ядром атома. Їх називають зовнішніми або валентними електронами, оскільки вони визначають властивість даного елемента – здатність його атомів входити в хімічний зв'язок з певним числом інших атомів.

Валентні електрони кожного атома металу мають здатність вільно рухатись в межах даного кристалічного тіла. Сукупність вільних електронів можна розглядати як електронний газ, що має властивості

деякого ідеального газу. Якщо ж електричне поле відсутнє, вільні електрони рухаються хаотично. У зовнішньому електричному полі напруженістю \vec{E} на кожний електрон діє сила eE , яка примушує електрони рухатися в одному напрямі, тобто виникає електричний струм. Опір металів обумовлений дефектами решітки і тепловими коливаннями решітки. Під час охолодження деяких металів і сплавів нижче певної критичної температури їх опір наближається до нуля. Це явище називають надпровідністю. Явище надпровідності відкрив у 1911 р. голландський фізик Г. Камерлінг-Оннес, вивчаючи електропровідність ртуті при низьких температурах (4,1 К).

Гази. Гази за нормальних умов погано проводять електричний струм, тобто є ізоляторами. Газ складається з нейтральних атомів і молекул. Внаслідок зовнішніх дій (опромінювання ультрафіолетовим, рентгенівським, радіоактивним випромінюванням, нагрівання і т.д.) газ іонізується, тобто від атомів і молекул відриваються електрони. Внаслідок іонізації утворюються позитивні іони і електрони. Коефіцієнтом іонізації β називають відношення числа іонів N , що виникли, до числа молекул газу N_0 в даному об'ємі.

$$\beta = \frac{N}{N_0}.$$

Поряд з іонізацією відбувається зворотний процес – *рекомбінація*, тобто об'єднання іона і електрона в нейтральну молекулу або атом.

Енергію, яку потрібно затратити для іонізації газу, називають *енергією іонізації*. Для різних газів енергія іонізації має різне значення і залежить від будови атома чи молекули. Необхідна умова іонізації – надання електронам значної швидкості:

$$\frac{m\mathcal{G}^2}{2} \geq A_i,$$

де A_i - робота іонізації,

\mathcal{G} і m – відповідно швидкість і маса електронів.

Процес проходження струму через газ називають газовим розрядом. Газовий розряд, який відбувається під дією іонізатора, називається несамоістійним (ділянка 0 – 2).

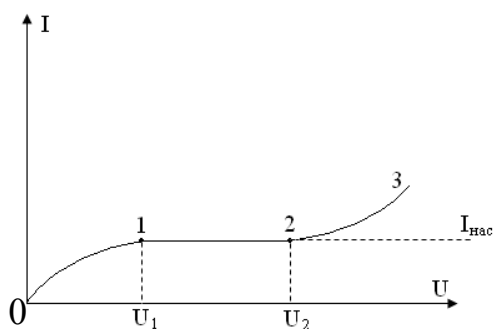


Рисунок 37

Вольт–амперна характеристика (залежність сили струму в колі від напруги) має такий вигляд (рис. 37).

При несамоістійному газовому розряді закон Ома не справджується (не існує пропорційної залежності між силою струму і прикладеною напругою). Починаючи з деякої напруги, сила струму не змінюється, настає *насичення*.

Струм насичення – це такий струм, під час якого всі заряджені частинки досягають електродів. Щоб збільшити струм насичення, треба збільшити дію іонізатора. Починаючи з деякої напруги, розряд продовжується після припинення дії іонізатора (ділянка 2-3). Такий розряд називається *самостійним*. Під впливом сильного електричного поля відбувається ударна іонізація електронів. Існують такі типи самостійного розряду: тліючий, коронний, іскровий, дуговий.

Тліючий розряд виникає при низьких тисках ($p \approx (0,01 \div 1)$ мм.рт.ст.). Він виникає внаслідок ударної іонізації газу в трубці і додаткового вибивання електронів з катода позитивними іонами. Тліючий розряд використовується в газосвітних трубках для оформлення реклам, в лампах денного світла, в газових лазерах.

Коронний розряд (у самому електричному полі) виникає поблизу зарядженого гострого провідника. Він спостерігається при атмосферному тиску навколо проводів високовольтної лінії. Чим вища напруга, тим товщим має бути провід. У техніці коронний розряд використовують в електрофільтрах, призначених для очищення промислових газів від домішок. Коронний розряд призводить до втрати енергії.

Іскровий розряд виникає у разі великої напруженості електричного поля (30000 В/см). Між електродами виникає електрична іскра, яка має вигляд дуже яскравої смуги складної форми.

Іскровий розряд має переривчастий характер, бо після пробією напруга на електродах значно спадає через те, що проміжок між електродами коротко замикається. Прикладом іскрового розряду є блискавка, пробій діелектрика.

Дуговий розряд. Якщо в колі є потужне джерело, то іскру можна перетворити в електричну дугу. Дуга виникає, якщо привести в контакт, а потім поступово розсовувати два вугільні електроди, які перебувають під напругою. Дуговий розряд виникає тоді, коли внаслідок нагрівання катода основною причиною іонізації газу є термоелектронна емісія – випромінювання електронів дуже нагрітими тілами. Дуговий розряд використовують під час зварювання металів, для освітлення, в дугових електропечах.

Плазма – це повністю іонізований газ, в якому концентрація позитивно і негативно заряджених частинок практично однакова (газорозрядна плазма, іоносфера, міжзоряне середовище).

Плазма з температурою 10^6 К і більше – гаряча плазма (зорі). Газорозрядну плазму використовують у магнетогідродинамічних генераторах (МГД – генератори) електроенергії для прямого перетворення внутрішньої енергії іонізованого газу в електроенергію.

Електричний струм у вакуумі

Вакуум – це стан розрідженого газу, молекули якого ударяються одна об одну рідше, ніж із стінками посудини, в якій вони знаходяться. Носіями

електричного струму у вакуумі будуть електрони, які вилітають з поверхні електрода внаслідок *термоелектронної емісії*.

Термоелектронна емісія – явище випромінювання електронів металами під час їх нагрівання до високої температури. Електрони вилітають з металу, якщо його енергія достатня, щоб виконати певну роботу – проти сил, що перешкоджають його вильоту:

$$A = e\phi,$$

де ϕ – поверхнева різниця потенціалів.

Електрон зможе вилетіти, якщо його кінетична енергія буде більша за роботу виходу:

$$\frac{m\vartheta^2}{2} \geq e\phi_i,$$

де m – маса електрона,

ϑ – його швидкість.

Явище термоелектричної емісії використовують у таких електронних приладах, як діоди, тріоди, титроди, пентоди, електронно–променеві трубки.

Діод. Електронна лампа, яка складається з відкачаного до високого вакууму скляного або металевого балона, в якому є два електроди (катод і анод) (рис. 38). Катод (підігрітий електрод) виготовляють з тугоплавкого металу. Катод підігрівають до 2000 – 2500 К.

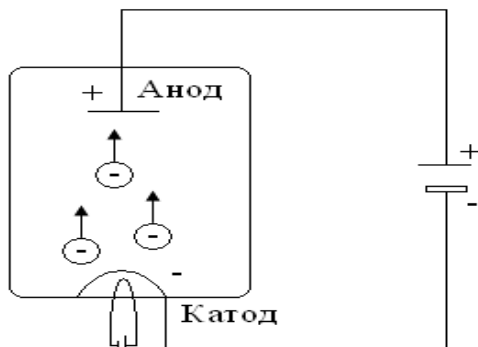


Рисунок 38

Залежність анодного струму від анодної напруги називають вольт–амперною характеристикою (ВАХ) (рис. 39).

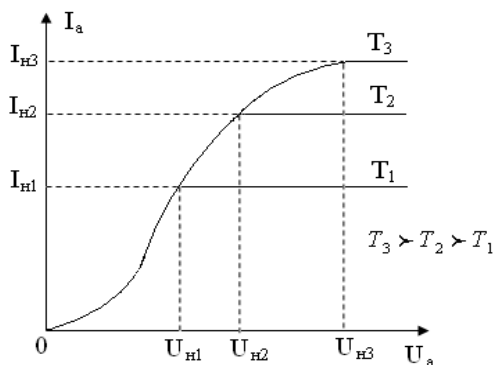


Рисунок 39

При деякому значенні напруги, що залежить від температури катода, струм досягає максимального значення і далі не змінюється, всі електрони досягають анода. Це значення сили струму називають струмом *насичення* I_n . Щоб збільшити струм, потрібно збільшити температуру T катода. Діод пропускає струм тільки в одному напрямі, коли анод з'єднано з позитивним полюсом джерела. Цю властивість діода використовують для випрямлення змінного струму.

Тріод. Щоб керувати силою струму в електронній лампі, в неї вводять третій додатковий електрод,

який називають сіткою (рис. 40). На сітку подають змінний потенціал, який керує рухом електронів від катода до анода.

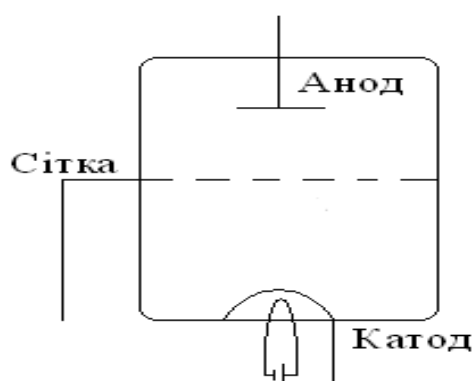


Рисунок 40

Сітку виготовляють у вигляді дротяних спіралей і розміщують між катодом і анодом. В триоді сітку розміщують поблизу катода так, щоб найменші зміни потенціалу сітки впливали на зміну анодного струму. Якщо потенціал сітки відносно катода дорівнює нулю, то триод працює як діод. Якщо потенціал сітки позитивний, то густина електронної хмари менша, отже струм більший. Якщо потенціал

сітки негативний, то густина електронної хмари біля катода збільшується, а струм зменшується. Негативну сіткову напругу, при якій анодний струм дорівнює нулю, називають напругою запирання. Змінюючи сіткову напругу, можна регулювати значення анодного струму в колі, тому сітку називають *керуючою*. Триод використовують для підсилення слабких струмів і напруг та генерації незатухаючих коливань.

Електричний струм у рідинах

Електроліти – це речовини, електричний струм у яких завжди супроводжується їх хімічними змінами. Це розчини солей, кислот і лугів у воді. У таких розчинах постійно відбувається розпад молекул на іони. Цей процес називається електролітичною дисоціацією. Внаслідок дисоціації в розчині утворюються позитивні (катіони) іони металів і водню та негативні (аніони) іони кислотних залишків і гідроксильної групи. У стані динамічної рівноваги розчин характеризується ступенем дисоціації γ – відношенням числа n молекул, які дисоціювали на іони, до загального числа n_0 молекул речовини:

$$\gamma = \frac{n}{n_0}.$$

Густина електричного струму в електроліті можна визначити за законом Ома:

$$\vec{j} = \frac{\vec{E}}{\rho} = \delta \vec{E},$$

де ρ – питомий опір електроліту,

δ – питома провідність електроліту.

При підвищенні температури питомий опір електроліту зменшується, а питома провідність збільшується. Проходження електричного струму через електроліт супроводжується явищем *електролізу* – виділення на електродах речовин, що входять до складу електроліту. Англійський фізик М. Фарадей в 1833 р. установив закони електролізу.

Перший закон електролізу: маса m речовини, яка виділяється на електроді, пропорційна електричному заряду Q , що пройшов через електроліт:

$$m = kQ,$$

$$m = kIt,$$

де $I=Q/t$ – сила пропорційного струму, що проходить через розчин за час t ,

k – електрохімічний еквівалент речовини, який дорівнює масі речовини, що виділилася на електроді під час проходження через електроліт заряду в 1 Кл.

Другий закон електролізу: електрохімічний еквівалент речовини k пропорційний її хімічному еквіваленту $\frac{M}{n}$:

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n},$$

де M – молярна маса,

F – стала Фарадея.

$$F = 9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл/кг} \approx 96500 \text{ Кл/моль.}$$

$$m = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n} \cdot Q - \text{об'єднаний закон електролізу Фарадея.}$$

Електроліз використовують для добування чистих металів, покриття металевим шаром виробів з металів (гальваностегія), електролітичного полірування (гальванопластика).

Електричний струм у напівпровідниках

Напівпровідники – це речовини, в яких електропровідність займає проміжне місце між провідниками і діелектриками. До напівпровідників належать кремній, селен, хімічні з'єднання елементів III групи з елементами V групи. Питомий опір напівпровідників знаходиться в межах від 10^4 до 10^{-5} Ом·м. В результаті відриву електронів від атома виникають вільні електрони. Вакантне місце (позитивно заряджений іон) для електрона утворює так звану дірку. Дірці відповідає надлишковий позитивний заряд порівняно з сусідніми неіонізованими атомами, тому рух дірки рівнозначний рухові позитивного заряду. Якщо внести провідник в зовнішнє електричне поле, то хаотичний рух дірок і електронів переходить в напрямлений. Струм в таких провідниках зумовлений рухом електронів і дірок (власна провідність). Концентрація дірок і електронів однакова. Власна провідність напівпровідників мала. Незначна кількість домішок у провідниках значно підвищує їх провідність. Домішки зумовлюють додаткову (домішкову) провідність. Домішкова провідність буває донорною і акцепторною. Домішки, які віддають електрони, називаються донорами, а напівпровідники з електронною провідністю – електронними напівпровідниками (n -типу). Електронну провідність отримують, коли валентність елемента, що додається, більша за валентність основного

напівпровідника. Наприклад, до германію (IV-валентний) додати миш'як (V-валентний). У таких напівпровідниках рух дірок майже відсутній. Якщо домішки мають валентність меншу, ніж основний напівпровідник, їх називають акцепторами, а напівпровідник – дірковим напівпровідником (p-типу). В перекладі n-тип (негативний), p-тип (позитивний). При контакті двох напівпровідників n-типу і p-типу на їх межі внаслідок дифузії і рекомбінації електронів і дірок виникає тонкий шар, збіднений носіями струму, який має підвищений опір (p-n – перехід). Якщо ввімкнути напівпровідник з p-n – переходом в електричне коло так, щоб потенціал частини з p – провідністю був позитивним, а частини з n – провідністю – негативним, то через нього буде проходити струм. Такий перехід називають прямим (рис. 41). Якщо знаки потенціалів на кінцях напівпровідника поміняти, то зворотний струм буде досить малим, а опір провідника досить великим. Такий перехід називають зворотним.

Властивості p-n – переходу (малий опір у прямому напрямі і великий у зворотному) використовують для випрямлення змінного струму (напівпровідникові діоди).

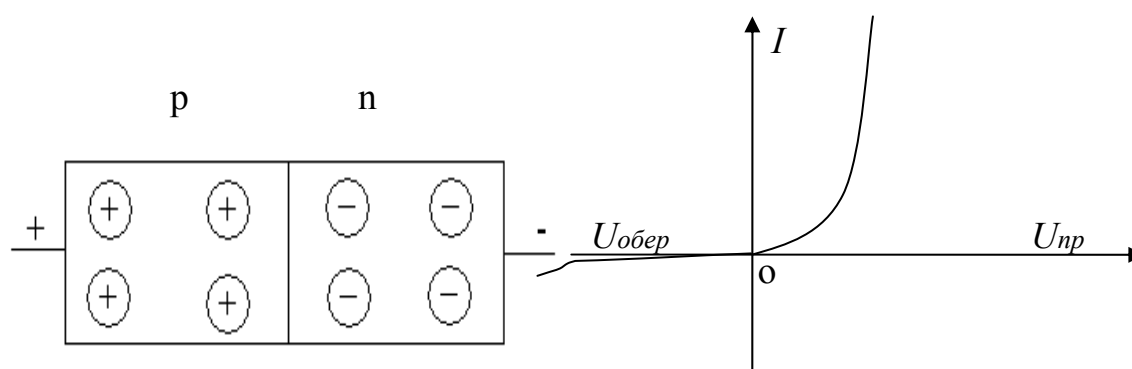


Рисунок 41

Приклади розв'язування задач

1. За час електролізу розчину HCl на аноді виділилося 35 г хлору. Скільки водню виділиться на катоді за цей самий час?

Розв'язання

Дано $m_{Cl} = 0,035 \text{ кг}$ $k_{Cl} = 0,0367 \cdot 10^{-6} \text{ кг/Кл}$ $k_H = 0,01 \cdot 10^{-6} \text{ кг/Кл}$	Виходячи з першого закону Фарадея для електролізу, отримаємо: $m_H = k_H Q, \quad m_{Cl} = k_{Cl} Q,$ де k_H і k_{Cl} електорохімічні еквіваленти водню і хлору, Q - заряд.
$m_H = ?$	

Звідси видно: $\frac{m_H}{k_H} = \frac{m_{Cl}}{k_{Cl}}$ або $m_H = \frac{k_H}{k_{Cl}} m_{Cl}$.

$$\text{Обчислимо: } m_H = \frac{0,01 \cdot 10^{-6} \cdot 0,035}{0,0367 \cdot 10^{-6}} = 0,001 \text{ кг.}$$

Відповідь: $m_H = 0,001$ кг.

2. Сталеві деталі покриваються двовалентним нікелем у електролітичній ванні при густині сили струму 400 А / м^2 . Скільки потрібно часу, щоб на деталі утворився шар нікелю завтовшки 60 мкм ?

Розв'язання

Дано

$$j = 400 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$$

$$\mu = 58,7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}}$$

$$n = 2$$

$$\rho = 8,8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$$

$$h = 60 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$F = 96500 \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}}$$

$$k = 3 \cdot 10^{-7} \frac{\text{КГ}}{\text{КЛ}}$$

$$t - ?$$

Виходячи із закону Фарадея.

1-й спосіб:

Запишемо масу покриття через його об'єм і густину: $m = \rho Sh$, а із закону електролізу маса визначається:

$$m = \frac{\mu It}{Fn}$$

Прирівнявши, отримаємо:

$$\frac{\mu It}{Fn} = \rho Sh, \text{ врахувавши що } j = \frac{I}{S}, \text{ визначимо час}$$

$$t = \frac{Fn\rho h}{\mu j}$$

Зробимо обчислення:

$$t = \frac{8,8 \cdot 10^3 \cdot 60 \cdot 10^{-6} \cdot 96500}{58,71 \cdot 10^{-3} \cdot 400} = 4340 \text{ с.}$$

2-й спосіб:

Використавши табличне значення електрохімічного еквівалента нікелю і 1-й закон електролізу, отримаємо:

$$kIt = \rho Sh, \quad t = \frac{\rho h}{kj}, \quad t = \frac{8,8 \cdot 10^3 \cdot 60 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-7} \cdot 400} = 4340 \text{ с.}$$

Відповідь: $t = 4340$ с.

3. Яку швидкість має електрон, що пройшов різницю потенціалів 100 В у вакуумі?

Розв'язання

Дано

$$U = 100 \text{ В}$$

$$q_e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$v - ?$$

Коли електрон рухається під дією сил електричного поля у вакуумі, то за рахунок роботи сил поля він одержує кінетичну енергію:

$$q_e U = \frac{m_e v^2}{2},$$

$$\vartheta = \sqrt{\frac{2q_e U}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 100}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 5,9 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Відповідь: $\vartheta = 5,9 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

4. При опроміненні рентгенівськими променями газу у двоелектродній трубці щосекунди утворюється $5 \cdot 10^{15}$ пар іон-електронів. Яка сила струму насичення, якщо до електродів трубки прикласти напругу?

Розв'язання

<p>Дано</p> <p>$n = 5 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$</p> <p>$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$</p> <p>$t = 1 \text{ с}$</p> <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black;"/> <p>$I = ?$</p>	<p>Струм створюється рухом іонів та рухом електронів.</p> $I = \frac{q}{t} = \frac{2ne}{t},$ $I = \frac{2 \cdot 5 \cdot 10^{15} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$
---	--

Відповідь: $I = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ А}$.

Задачі для самостійного розв'язання

1. Електрон, маючи швидкість $\vartheta = 2000 \text{ км/с}$, проходить у прискорювальному електричному полі різницю потенціалів 50 В . Визначити його кінетичну енергію.

Відповідь: $9,82 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$.

2. Для іонізації нейтральної молекули повітря електрон повинен мати енергію $2,4 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$. Якою повинна бути напруженість електричного поля, щоб електрон у ньому набув такої енергії? Довжину вільного пробігу електрону приймаємо $0,0005 \text{ см}$.

Відповідь: $3 \cdot 10^6 \text{ В/м}$.

3. Робота іонізації атома ртуті $10,4 \text{ еВ}$. З якою найменшою швидкістю повинен рухатись електрон, щоб при ударі об атом ртуті він міг іонізувати його?

Відповідь: $1,9 \cdot 10^6 \text{ м/с}$.

4. При нікелюванні виробу протягом $1,5 \text{ год}$ на ньому утворився шар нікелю завтовшки $0,03 \text{ мм}$. Визначити середнє значення густини струму.

Відповідь: $j = 163 \text{ А/м}$.

5. Визначити товщину осадженого шару нікелю, якщо електроліз триває 1 год при густині струму $0,4 \text{ А/дм}^2$.

Відповідь: $0,0005 \text{ мм}$.

6. При електролізі розчину сірчаної кислоти за 50 хв виділилося $0,0005 \text{ кг}$ водню. Визначити потужність, яка витрачається на нагрівання електролізу, якщо його опір $0,4 \text{ Ом}$.

Відповідь: $P = 36,6 \text{ Вт}$.

3.2. Магнетизм

3.2.1 Магнетне поле. Сила Ампера. Сила Лоренца

Магнетне поле – це особлива форма матеріальної взаємодії. Воно виникає: 1) між рухомими зарядженими частинками, 2) між провідниками зі струмом, 3) між струмом і рухомим зарядом. Магнетне поле – одна з форм електромагнетного поля. Завжди, коли існує змінне електричне поле, виникає й магнетне поле. Магнетне поле, характеристики якого не змінюються з часом, називається стаціонарним. Силовою характеристикою магнетного поля є вектор індукції магнетного поля \vec{B} . За напрям вектора

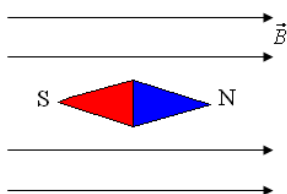


Рисунок 42

магнетної індукції в місці розташування вільної маленької рамки зі струмом беруть напрям перпендикуляра до рамки. Останній визначають напрямом руху свердлика (правого гвинта), який потрібно обернути в напрямі струму в рамці.

Правило свердлика: якщо рукоятку свердлика з правою різьбою обернути за напрямком струму в рамці, то напрям вектора \vec{n} збігається з напрямком руху свердлика. Направ вектора магнетної індукції \vec{B} збігається з напрямком осі магнетної стрілки в полі (від південного полюса до північного) (рис. 42).

Графічно магнетне поле зображають лініями магнетної індукції, дотичні до яких збігаються з напрямом вектора магнетної індукції в даній точці. Лінії магнетної індукції завжди замкнуті на відміну від ліній електростатичного поля, які починаються і закінчуються на зарядах. Такі поля називають вихровими.

На прямолінійний провідник зі струмом в магнетному полі діє сила, перпендикулярна до напрямку струму і вектора магнетної індукції (сила Ампера):

$$F_A = BIl \sin \alpha,$$

де B – індукція поля,

I – сила струму в провіднику,

l – довжина провідника,

α – кут між провідником і напрямом вектора магнетної індукції.

Направ сили Ампера визначають за правилом лівої руки: якщо розташувати ліву руку так, щоб силові лінії магнетного поля входили в долоню, а чотири випрямлені пальці вказували напрямку струму, то відігнутий на 90° великий палець покаже напрям сили Ампера (рис. 43).

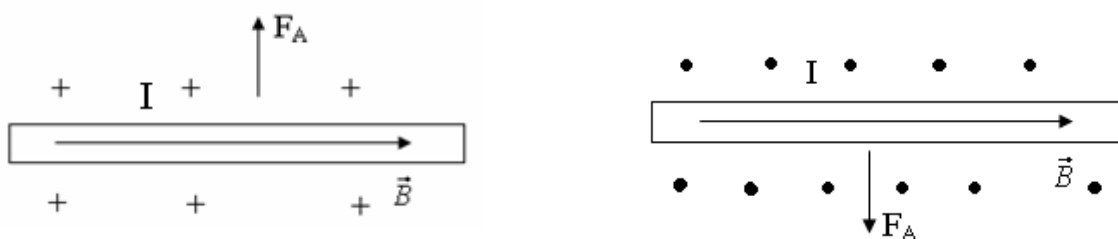


Рисунок 43

Провідники зі струмом одного напрямку притягаються, різного напрямку відштовхуються. Сила взаємодії двох провідників із струмом визначається за формулою:

$$F = \mu\mu_0 \frac{I_1 I_2 \ell}{2\pi d},$$

де ℓ – довжина провідника,
 $I_1 I_2$ – відповідні струми,
 d – відстань між провідниками,
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м,
 μ_0 – магнетна стала,

μ – магнетна проникність середовища: $\mu = \frac{B}{B_0}$ - показує, в скільки разів

вектор магнетної індукції в однорідному середовищі більший за вектор магнетної індукції у вакуумі. На заряджену частинку у магнетному полі, яка рухається зі швидкістю \vec{v} , діє сила Лоренца:

$$F_{\perp} = qB \sin \alpha,$$

де q – заряд частинки,
 v – швидкість частинки,
 α – кут між вектором швидкості і вектором магнетної індукції.

Напрямок сили Лоренца визначається за правилом лівої руки, яке справджується для руху позитивних заряджених частинок. Для негативних – напрям вважається протилежним напрямку їх руху. Сила Лоренца завжди перпендикулярна до швидкості частинки, тому вона не виконує роботи.

Якщо частинка влітає в електричне поле під кутом α :

1. $\alpha = 0^\circ$

В цьому випадку частинка рухається по інерції ($v = \text{const}$) (рис. 44).

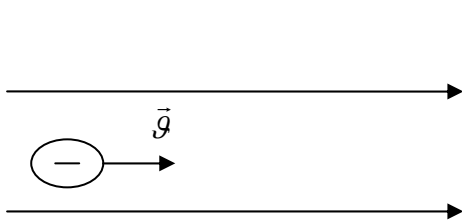


Рисунок 44

2. $\alpha = 90^\circ$

В = const, то частинка описує коло (рис. 45).

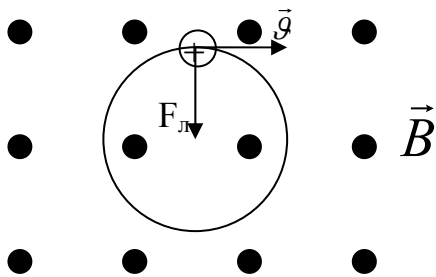


Рисунок 45

$$F_{\perp} = \frac{mv^2}{R} = qvB,$$

$$R = \frac{mv}{qB}.$$

Період обертання зарядженої частинки:

$$T = \frac{2\pi R}{g} = \frac{2\pi m}{qB}$$

$$3. \alpha < 90^\circ$$

Швидкість частинки напрямлена під кутом α до магнетного поля. Під дією сили Лоренца частинка рухається по гвинтовій лінії (рис. 46).

$$h = g_1 T,$$

де T – період обертання,

h – крок спіралі.

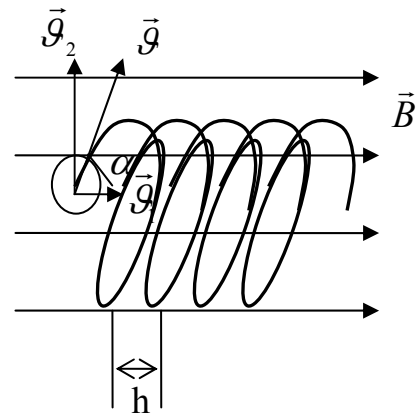


Рисунок 46

Приклади розв'язування задач

1. На провідник завдовжки 0,8 м, що міститься в однорідному магнетному полі перпендикулярно до силових ліній, діє сила в 5 Н, коли по провіднику проходить струм 5 А. Визначити магнетну індукцію поля.

Розв'язання

Дано
 $F = 5 \text{ Н}$
 $I = 5 \text{ А}$
 $l = 0,8 \text{ м}$
 $B - ?$

У магнетному полі на провідник із струмом діє сила Ампера:

$$F = BIl \sin \alpha.$$

Оскільки $\alpha = 90^\circ$, $\sin 90^\circ = 1$.

$$F = BIl, \quad B = \frac{F}{Il},$$

$$B = \frac{5}{5 \cdot 0,8} = 1,25 \text{ Тл.}$$

Відповідь: 1,25 Тл.

2. Протон у магнетному полі з індукцією 0,01 Тл, описав півкола радіусом 10 см. Знайти швидкість протона і період його обертання.

Розв'язання

Дано
 $B = 0,01 \text{ Тл}$
 $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
 $m = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
 $R = 0,1 \text{ м}$
 $g - ?$
 $T - ?$

В магнетному полі на протон діє сила Лоренца:

$$F = qB g \sin \alpha, \quad F = q g B$$

Ця сила напрямлена по радіусу до центра і надає протону доцентрового прискорення:

$$a_{\circ} = \frac{g^2}{R}, \quad \text{тоді} \quad \frac{m g^2}{R} = q g B \Rightarrow V = \frac{BqR}{m},$$

$$g = \frac{0,01 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,1}{1,67 \cdot 10^{-27}} = 9,6 \cdot 10^6 \text{ м/с.}$$

А період обертання протона в магнетному полі:

$$T = \frac{2\pi R}{g} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,1}{9,6 \cdot 10^4} = 6,5 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Відповідь: $9,6 \cdot 10^4$ м/с; $6,5 \cdot 10^{-6}$ с.

3. Два паралельних тонких провідники розміщені у повітрі на відстані 60 см один від одного. Визначити силу взаємодії провідників на довжині 3 м, якщо по першому проходить струм 15 А, а по другому - 30 А. Струм проходить в одному напрямі.

Розв'язання

Дано	Силу взаємодії двох паралельних провідників визначимо за формулою:
$d = 0,6 \text{ м}$	
$I_1 = 15 \text{ А}$	
$I_2 = 30 \text{ А}$	
$l = 3 \text{ м}$	
$\mu = 1$	$F = \mu\mu_0 \frac{I_1 I_2 l}{2\pi d},$
$F - ?$	$F = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 15 \cdot 30 \cdot 3}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,6} = 45 \cdot 10^{-5} \text{ Н} = 4,5 (\text{ мН}).$

Відповідь: 4,5 мН.

4. Заряд із сталою швидкістю g влітає в однорідне магнетне поле терпендикулярно до ліній індукції. Індукція поля 1 Тл. Протягом 10^{-4} с паралельно магнетному полю діє електричне поле напруженістю 100 В/м. Обчислити сталий крок спіральної траєкторії заряду.

Розв'язання

Дано	Сила Лоренца
$B = 1 \text{ Тл}$	
$E = 100 \text{ В/м}$	
$t = 10^{-4} \text{ с}$	
$h - ?$	дорівнює доцентровій силі: $F = \frac{m g^2}{R}.$

Прирівнявши, отримаємо радіус кола R , по якому рухається заряд: $Bqg = \frac{m g^2}{R} \Rightarrow R = \frac{m g}{Bq}.$

$$\text{Період обертання заряду: } T = \frac{2\pi R}{g} = \frac{2\pi m}{Bq}.$$

Якщо електричне поле діє короткочасно, то виникає електрична складова сили Лоренца, напрямлена паралельно полю.

$$F_{el} = qE,$$

де E – напруженість електричного поля.

За час t складова швидкості зростає від 0 до g_1 , тоді

$$F_{el} t = m g_1,$$

$$g_1 = \frac{qEt}{m}.$$

Наявність складової швидкості g_1 , яка перпендикулярна до g , означає, що заряд рухається по спіралі.

$$h = \mathcal{A}_1 t = \frac{qEt}{m} \cdot \frac{2\pi m}{Bq} = \frac{E}{B} 2\pi t,$$

$$h = \frac{100 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4}}{1} = 0,06 \text{ Тл.}$$

Відповідь: 0,06 Тл.

Задачі для самостійного розв'язання

1. З якою силою виштовхується провідник з магнетного поля, якщо магнетна індукція поля 1,3 Тл, активна довжина провідника 2 м, струм у ньому 10 А, кут між напрямками струму і поля а) 90° б) 30°?

Відповідь: 2,6 Н, 1,3 Н.

2. Два паралельних провідники із струмом по 50 А в кожному розміщені на відстані $2,5 \cdot 10^{-2}$ м один від одного. Визначити силу взаємодії між провідниками, яка припадає на одиницю довжини, і знайти напрям дії сили, коли: а) струми в провідниках мають однакові напрями, б) протилежні напрями.

Відповідь: 0,02 Н/м.

3. Якої сили струм проходить по провіднику, що міститься в однорідному магнетному полі з індукцією 1 Тл, якщо його активна довжина 0,1 м і він виштовхується з цього поля силою 1,5 Н? Кут між напрямками поля і струму 49°.

Відповідь: 20 А.

4. Електрон рухається в однорідному магнетному полі, індукція якого $B=4$ мТл. Визначити період обертання електрона.

Відповідь: 8,9 нс.

5. Протон у магнетному полі, індукція якого 0,01 Тл, описав коло радіусом 10 см. Яка швидкість протона?

Відповідь: 96 км/с.

6. Провідник довжиною ℓ і масою m підвісили на тонких дротинах. Під час проходження по ньому струму I він відхилився в однорідному магнетному полі так, що дротини утворили кут α з вертикалями. Яка індукція магнетного поля?

Відповідь: $B = \frac{mg \cdot \operatorname{tg} \alpha}{I \ell}$.

7. В однорідне магнетне поле з індукцією $B=10$ мТл перпендикулярно до ліній індукції влітає електрон, кінетична енергія якого $W_k = 30$ кеВ. Обчислити радіус кривизни траєкторії руху електрон у полі.

Відповідь: 5,8 см.

8. Однорідні електричне і магнетне поля розташовані взаємно перпендикулярно. Напруженість електричного поля становить 1 кВ/м, а індукція магнетного поля 1 мТл. Якими мають бути напрями і значення швидкості електрона, щоб траєкторія його руху була прямолінійною?

Відповідь: 1000 км/с.

3.2.2. Магнетний потік. Електромагнетна індукція

Магнетним потоком (потокот магнетної індукції) Φ через поверхню S називають фізичну величину, яка дорівнює добутку B_n (проекції вектора магнетної індукції на нормаль до поверхні) на площу (рис.47):

$$\Phi = B S \cdot \cos \alpha.$$

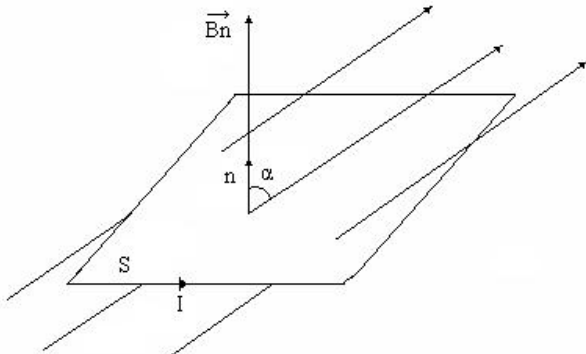


Рисунок 47

Магнетний потік є скалярною величиною. У СІ одиницею магнетного потоку є вебер (Вб). Магнетний потік Φ може бути позитивним ($\Phi > 0$) і негативним ($\Phi < 0$). Знак залежить від вибору позитивного напрямку нормалі. Напрямок нормалі визначається напрямом струму в контурі. За додатний напрям вибирають такий, що збігається з напрямом переміщення гвинта з правою нарізкою під час обертання його в напрямі струму.

Електричні струми створюють навколо себе магнетне поле. А чи можна за допомогою змінного магнетного поля отримати електричний струм? Цю задачу розв'язав у 1831 р. М. Фарадей.

В замкненому провідному контурі при зміні магнетного потоку, охопленого цим контуром, виникає електричний струм, який отримав назву *індукційного*, а саме явище – *явища електромагнетної індукції*.

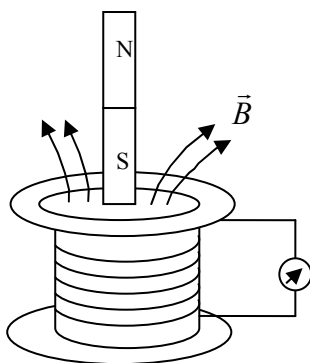


Рисунок 48

При внесенні магнету в котушку, приєднану до гальванометра, стрілка відхилялась в одному напрямку, при винесенні магнету – в протилежному (рис. 48).

Якщо магнет нерухомий, то струму немає.

Можна переміщати котушку відносно нерухомого магнету, при цьому гальванометр показує струм.

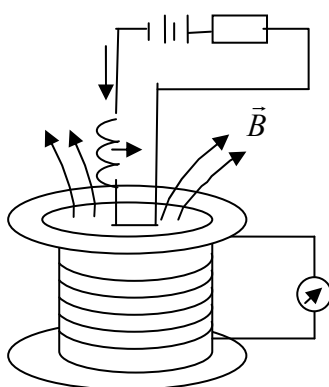


Рисунок 49

Можна вносити провідник із струмом в котушку, при цьому також виникає індукційний струм (рис. 49).

Між змінними електричним і магнетним полями існує тісний зв'язок: електричне поле породжує магнетне і, навпаки, магнетне породжує електричне. Явище електромагнетної індукції полягає у виникненні індукційного струму в будь-якому замкненому провідному контурі при зміні магнетного потоку, який пронизує цей контур. Індукційний струм виникає, якщо рухати котушку

або магнет так, щоб змінювалась кількість ліній магнетної індукції, які пронизують замкнутий контур

Індукційний струм виникає завжди, якщо силові лінії перетинають витки котушки.

Дослідами було встановлено, що величина індукційного струму не залежить від засобу зміни потоку магнетної індукції, а визначається лише швидкістю його зміни. Цим був встановлений зв'язок між електричними і магнетними явищами, що в подальшому став поштовхом для розробки теорії електромагнетного поля.

Закон Фарадея для електромагнетної індукції:

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Якщо у котушці існує n витків, ЕРС в n раз буде більшою:

$$\varepsilon_i = - n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

ЕРС електромагнетної індукції в контурі чисельно дорівнює і протилежно напрямлена за знаком швидкості зміни магнетного потоку через поверхню, обмежену цим контуром.

Знак “ – “ показує, що поле індукційного струму напрямлене назустріч потоку, тобто за правилом Ленца (1833 р.):

індукційний струм у замкнутому контурі напрямлений так, що створений ним магнетний потік через площину, обмежену контуром, протидіє зміні магнетного потоку, який збуджує даний струм.

Пізніше Максвелл пояснив явище: будь-яке змінне магнетне поле збуджує в навколишньому просторі змінне електричне поле, яке і є причиною виникнення індукційного струму в провіднику.

При переміщенні провідника довжиною ℓ в магнетному полі з швидкістю \mathcal{G} він описує площу: $\ell \cdot \mathcal{G} \cdot \Delta t$, тоді

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = - \frac{BS}{\Delta t} = - \frac{B \cdot \ell \cdot \mathcal{G} \cdot \Delta t}{\Delta t} = -B\ell\mathcal{G}.$$

Якщо вектор швидкості \mathcal{G} складає з напрямком B кут α , тоді

$$\varepsilon_i = - B \cdot \ell \cdot \mathcal{G} \cdot \text{Sin}\alpha.$$

У масивних металевих провідниках, які рухаються в магнетному полі, виникають короткозамкнені індуковані струми. Ці струми називаються вихровими. Відкрив і дослідив ці струми французький фізик Фуко, ім'ям якого їх називають (струми Фуко). Напрями струмів Фуко визначають за правилом Ленца.

В більшості випадків вихрові струми шкідливі, їх намагаються зменшити. Вихрові струми використовують для нагрівання або плавлення металів (індукційні печі).

Окремим випадком явища електромагнетної індукції є *самоіндукція* – явище виникнення ЕРС індукції в електричному колі внаслідок зміни струму в ньому.

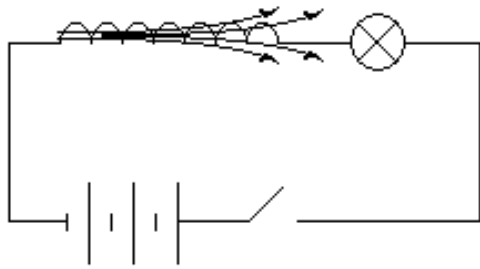


Рисунок 50

В момент замикання електричного кола струм збільшується від 0 до I_{max} за Δt , при цьому збільшується і магнетний потік Φ , який створює котушка. Цей потік перетинає витки котушки і за законом Ленца створює в провіднику

ЕРС, яка перешкоджає зростанню струму, тобто змінюється електричний струм, що в провіднику створює ЕРС (рис. 50).

ЕРС самоіндукції виникає при будь-якій зміні струму в колі, в тому разі й при розімкненні струму в колі.

$$\varepsilon_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

ЕРС самоіндукції пропорційна швидкості зміни сили струму.

L – індуктивність Гн (Генрі). Фізичний зміст індуктивності:

$$L = \varepsilon_c, \text{ якщо } \frac{\Delta I}{\Delta t} = I \frac{A}{c}.$$

Генрі – це індуктивність котушки, в якій зміна струму на 1 А в 1 с збуджує ЕРС самоіндукції 1 В.

Індуктивність залежить від розмірів, форми, числа витків котушки. Індуктивність дуже зростає при внесенні в середину котушки осердя з феромагнітного матеріалу.

Додатковий струм, який виникає в провіднику, називається екстраструмом. Екстраструм протилежно направлений зростаючому і збігається зі струмом джерела, якщо той зменшується.

Швидкість зміни магнетного потоку Φ прямо пропорційна швидкості зміни електричного струму I :

$$\Phi = LI.$$

Величина, яка дорівнює відношенню індуктивності L контуру в однорідному середовищі до індуктивності L_0 контуру у вакуумі, є відносною магнетною проникністю середовища:

$$\mu = \frac{L}{L_0}.$$

Відносна магнетна проникність, яка характеризує магнетні властивості речовини, - величина безрозмірна.

Якщо контур, який складається з провідника, помістити поблизу контуру 1 зі струмом, що змінюється з часом, то в другому провіднику ми зафіксуємо індукване електричне поле (рис. 51).

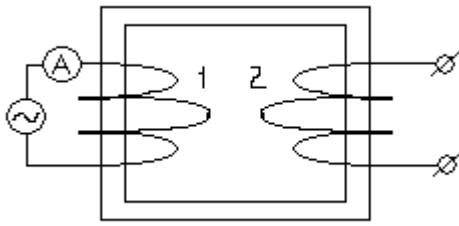


Рисунок 51

Явище виникнення індуковано-електричного поля в провідниках, розміщених поблизу від інших провідників, по яких проходить змінний у часі електричний струм, називається взаємоіндукцією.

На явищі взаємної індукції ґрунтується дія трансформаторів – пристроїв, призначених для перетворення напруги й сили змінного струму. Він складається з двох обмоток (катушок) з різною кількістю витків на спільному сталевому замкнутому осерді. Обмотка, що приєднується до генератора змінного струму, називається первинною, а обмотка, що приєднується до навантаження, – вторинною. Відношення індукованих в обмотках електрорушійних сил дорівнює відношенню наявності витків у цих обмотках:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{n_1}{n_2} = k,$$

де k - коефіцієнт трансформації.

Якщо напруга U_1 в первинній обмотці менша за напругу U_2 , то трансформатор підвищувальний, і знижувальний, якщо $U_1 > U_2$.

Для створення струму в контурі необхідно виконати роботу для подолання ЕРС самоіндукції, тобто затратити деяку енергію. Ця енергія накопичується магнетним полем контуру зі струмом. Вона виділяється при розмиканні кола. Енергія магнетного поля струму визначається за формулою:

$$W_m = \frac{LI^2}{2}.$$

Коли провідник зі струмом переміщується під дією сил магнетного поля, виконується робота, що дорівнює добутку сили струму на зміну магнетного потоку:

$$A = I(\Phi_2 - \Phi_1) = I \Delta\Phi.$$

Приклади розв'язування задач

1. Скільки витків має катушка індуктивністю 0,003 Гн, якщо при зміні струму на 3 А магнетний потік всередині катушки дорівнює $6 \cdot 10^{-6}$ Вб?

Розв'язання

Дано
$L=0,003$ Гн
$\Delta I = 3$ А
$\Delta\Phi = 6 \cdot 10^{-6}$ Вб
$n=?$

$$\text{ЕРС індукції: } \varepsilon_i = -n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

У катушці відбувається зміна струму, тому в ній

$$\text{виникає ЕРС самоіндукції: } \varepsilon_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Прирівнявши $\varepsilon_i = \varepsilon_c$

$$-n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

$$n = \frac{L\Delta I}{\Delta t}.$$

Підставивши числові значення, дістанемо: $n = \frac{0,003 \cdot 3}{6 \cdot 10^{-6}} = 1500$ витків.

Відповідь: $n = 1500$ витків.

2. Знайти індуктивність провідника, в якому збільшення сили струму від 1,5 А до 3,5 А протягом 0,25 с збуджує ЕРС самоіндукції 20 мВ.

Розв'язання

Дано

$$I_1 = 1,5 \text{ A}, I_2 = 3,5 \text{ A}$$

$$t = 0,25 \text{ c}$$

$$\varepsilon_i = 20 \text{ мВ} = 0,02 \text{ В}$$

$$L = ?$$

ЕРС самоіндукції, яка виникає в провіднику при зміні сили струму в ньому:

$$\varepsilon_i = \left| L \frac{\Delta I}{\Delta t} \right|, \quad L = \frac{\varepsilon_i \Delta t}{\Delta I}.$$

$$L = \frac{2 \cdot 10^{-2} \cdot 0,25}{3,5 - 1,5} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} = 2,5 \text{ мГн}.$$

Відповідь: $L = 2,5$ мГн.

3. В однорідному магнетному полі індукцією 0,1 Тл розміщена прямокутна рамка ABCD, рухома сторона якої BC переміщається зі швидкістю 10 м/с перпендикулярно до ліній індукції поля. Визначити ЕРС індукції, яка виникає в котушці ABCD. Визначити напрям індукційного струму. Довжина сторони рамки BC дорівнює 0,1 м.

Розв'язання

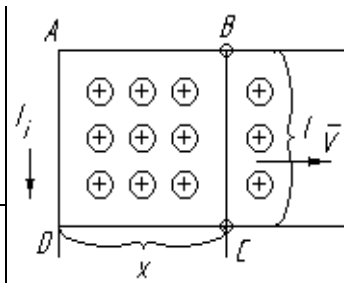
Дано

$$v = 10 \text{ м/с}$$

$$l = 0,1 \text{ м}$$

$$B = 0,1 \text{ Тл}$$

$$\varepsilon_i = ?$$



Під час руху провідника BC магнетний потік збільшується, тому в рамці виникає ЕРС індукції:

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Рамку пронизує магнетний потік:

$$\Phi = BS = Blx$$

$$\varepsilon_i = -Bl \left(\frac{\Delta x}{\Delta t} \right)$$

B і l не змінюються, змінюється тільки x .

Врахуємо $\frac{\Delta x}{\Delta t} = v$ - швидкість руху провідника BC, отже $\varepsilon_i = -Blv$.

$$\varepsilon_i = -0,1 \cdot 0,1 \cdot 10 = -0,1 \text{ В}.$$

Знак мінус показує, що ЕРС індукції діє в контурі ABCD в такому напрямі, при якому індукційний струм напрямлений у контурі проти руху стрілки годинника.

Відповідь: $\varepsilon_i = -0,1$ В.

4. Струм якої сили має проходити в обмотці дроселя з індуктивністю 0,5 Гн, щоб енергія поля дорівнювала 1 Дж?

Розв'язання

Дано $L = 0,5 \text{ Гн}$ $W_m = 1 \text{ Дж}$	Енергія магнетного поля струму визначається за формулою:	$W_m = \frac{LI^2}{2}$
$I = ?$	Обчислимо: $I = \sqrt{\frac{2W_m}{L}}$, $I = \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{0,5}} = 2 \text{ А}$.	

Відповідь: $I = 2 \text{ А}$.

5. Плоска прямокутна котушка, сторони якої дорівнюють 10 см і 5 см, має 200 витків і перебуває в однорідному магнетному полі з індукцією 0,05 Тл. Який максимальний обертальний момент може діяти на котушку в цьому полі, якщо сила струму в котушці 2 А?

Розв'язання

Дано $N = 200$ $a = 10 \text{ см}$ $b = 5 \text{ см}$ $B = 0,05 \text{ Тл}$ $I = 2 \text{ А}$	Максимальний обертальний момент, яким магнетне поле діє на котушку із струмом	$M = BISN$,
$M = ?$	де N – кількість витків у котушці; S – площа одного витка, $S = ab$, тоді: $M = BINab$, підставивши числові значення отримаємо: $M = 0,05 \cdot 2 \cdot 0,1 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 200 = 0,01 \text{ Н} \cdot \text{м}$.	

Відповідь: $M = 0,01 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Задачі для самостійного розв'язання

1. Яку індуктивність має соленоїд, якщо при силі струму 5 А крізь нього проходить магнетний потік 50 МВб?
Відповідь: 10 МГн.
2. Якою має бути довжина активної частини провідника, що рухається в магнетному полі з індукцією 0,8 Тл перпендикулярно до напрямку потоку із швидкістю 10 м/с, щоб у провіднику індукувалась ЕРС 8 В?
Відповідь: 1 м.
3. Визначити магнетний потік, при зниканні якого за 0,01 с у котушці, що складається з 200 витків, наводиться ЕРС індукції 200 В.
Відповідь: 0,01 Вб.
4. У котушці, індуктивність якої становить 0,6 Гн, сила струму 20 А. Яку енергію має магнетне поле цієї котушки? Як зміниться енергія поля, коли сила струму зменшиться удвічі?
Відповідь: 120 Дж; зменшиться у 4 рази.
5. Визначити ЕРС індукції у провіднику довжиною активної частини 0,25 м, який переміщується в однорідному магнетному полі, що має індукцію 8 МТл, із швидкістю 5 м/с під кутом 30° до вектора магнетної індукції.

Відповідь: 5 мВ.

6. За 5 мс у соленоїді, що містить 500 витків дроту, магнетний потік рівномірно зменшується з 7 до 3 мВб. Визначити величину ЕРС індукції в соленоїді.

Відповідь: 400 В.

7. Через соленоїд, індуктивність якого 0,4 мГн і площа поперечного перерізу 10 см², проходить струм 0,5 А. Яка індукція магнетного поля всередині соленоїда, якщо він має 100 витків. Поле вважати всередині соленоїда однорідним.

Відповідь: $B=2$ мТл.

8. Скільки витків дроту повинна містити обмотка на сталевому осерді з поперечним перерізом 50 см², щоб у ній під час зміни магнетної індукції від 0,1 до 1,1 Тл протягом 5 мс збуджувалася ЕРС індукції 100 В?

Відповідь: 100.

4 КОЛИВАННЯ ТА ХВИЛІ

Коливальним називається рух, при якому матеріальна точка (або система точок), багаторазово відхиляючись від свого положення рівноваги, щоразу знову повертається до нього.

Коливання – це рухи, які повторюються через певні проміжки часу: рух поршня двигуна автомобіля, гойдання гілки дерева при вітрі, биття серця, коливання мостів, будівель, маятника годинника, камертона тощо.

Умови для виникнення коливань: наявність енергії у точці, що коливається, наявність повертальної сили, незначних сил опору.

Вільні коливання – це коливання, які виникають в системі під дією внутрішніх сил після того, як система була виведена з положення рівноваги.

Внутрішні – це сили, які діють між тілами системи; *зовнішні* – які діють на тіло системи з боку тіл, що не входять в неї. Прикладами вільних коливань є коливання на пружині, коливання математичного маятника.

Параметри коливальної системи

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

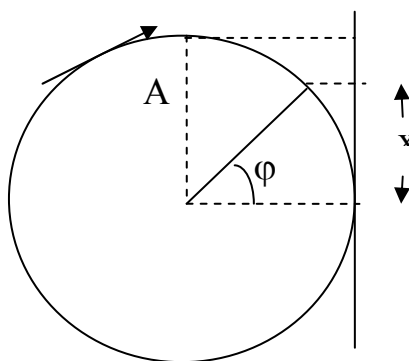


Рисунок 52

Розглянемо рух точки по колу. Її проекція на екрані буде здійснювати коливання навколо положення рівноваги (рис. 52).

x - зміщення (м) – відхилення від положення рівноваги. З рисунка бачимо:

$$x = A \sin \varphi,$$

де A амплітуда коливань (м) - максимальне зміщення;

ω - колова (циклічна) частота;
 t - час коливань;
 T - період коливань;
 ωt - фаза коливань;
 φ_0 - початкова фаза коливань;
 ν - частота коливань.

Фізичний зміст фази ωt полягає в тому, що вона визначає зміщення в будь-який момент часу, тобто визначає стан коливальної системи.

- а) $x = A \sin (\varphi + \varphi_0)$;
 б) $x = A \sin (\omega t + \varphi_0)$;
 в) $x = A \sin (\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0)$;
 г) $x = A \sin (2\pi\nu t + \varphi_0)$.

Рівняння а), б), в), г) називають рівняннями гармонічних коливань.

Швидкість матеріальної точки визначають:

$$v = A \omega \cos (\omega t + \varphi_0).$$

Прискорення матеріальної точки визначають:

$$a = -A \omega^2 \sin (\omega t + \varphi_0).$$

Повну енергію при гармонічних коливаннях визначають:

$$E_{повн.} = E_{кін} + E_{пот} = \frac{m v^2}{2} + \frac{k x^2}{2} = \frac{m A^2 \omega^2}{2}.$$

Математичним маятником називають матеріальну точку, яка підвішена на невагомій нерозтягнутій нитці (рис. 53).

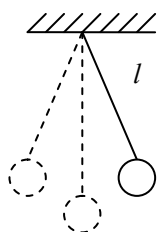


Рисунок 53

Період математичного маятника дорівнює:

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

де ℓ - довжина маятника.

Пружинний маятник являє собою коливання тіла, підвішеного на пружині. Його період коливань:

$$F = ma = m \omega^2 x; k = m \omega^2; \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}; T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Вимушені коливання. Резонанс

Практично будь-які вільні коливання є згасаючими, тому що рух супроводжується тертям, при цьому енергія переходить в теплоту. Амплітуда коливань поступово зменшується. Коли вся енергія перейде в теплоту, коливання згасне (рис. 54).

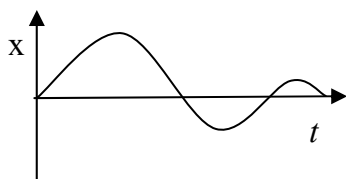


Рисунок 54

Для того, щоб система здійснювала незгасаючі коливання, необхідно поповнювати ззовні витрати енергії коливань на тертя. Для цього необхідно діяти на систему періодично змінною силою:

$$F = F_0 \sin \omega t,$$

де F_0 - амплітудне (максимальне) значення

сили;

ω - колова (циклічна) частота коливань;

t – час коливань.

Зовнішня сила, що забезпечує незатухаючі коливання системи, називається *вимушеною*, а коливання системи – *вимушені*.

Очевидно, що вимушені коливання відбуваються з частотою, яка дорівнює частоті вимушеної сили. Амплітуда вимушених коливань:

$$A = \frac{F_0}{m(\omega^2 - \omega_e^2)},$$

де ω - власна колова частота;

ω_e – вимушена колова частота.

Якщо частота вимушених коливань збігається з частотою власних коливань, то відбувається різкий зріст амплітуди вимушених коливань. Це явище отримало назву *резонансу*: $\omega_e \approx \omega$.

Застосування резонансу: в акустиці – для підсилення звуку; у вібраторах для ущільнення ґрунту та бетонної суміші, для занурення паль і труб у ґрунт; для очистки лиття; у вібростендах – для випробовування виробів на міцність і вібростійкість; в електротехніці – для підсилення електричних коливань.

Резонанс відіграє і негативну роль: вібрація будівель, мостів, опор, верстатів, двигунів.

Поперечні та повздовжні хвилі

Процес розповсюдження коливань всередині будь-якого середовища називається *хвилею*. Процес передачі коливань у середовищі називається *хвильовим процесом*. Хвилі можна утворити на поверхні води або на довгій мотузці. Поширення хвиль не супроводжується перенесенням частинок середовища, вони коливаються тільки біля свого положення рівноваги.

Повздовжні хвилі можуть розповсюджуватись у твердих, рідких та газоподібних середовищах. В рідинах та газах роль пружного середовища відіграє тиск, що збільшується в місцях стиснення та зменшується в місцях розрідження. Приклад: хвилі повітря від дзвону, що звучить.

В твердих тілах можуть виникати хвилі як повздовжні, так і поперечні, при розповсюдженні яких частинки в середовищі рухаються в напрямку, перпендикулярному до напрямку розповсюдження хвиль. Для виникнення таких хвиль необхідні пружні сили, що виникають при зсуві одного шару середовища відносно іншого.

Поперечні хвилі в рідких та газоподібних середовищах не розповсюджуються, але вони спостерігаються на поверхні рідини (падіння каменя на поверхню води).

Швидкість розповсюдження хвиль. Довжина хвилі

Відстань, на яку розповсюджується коливання в середовищі за час одного періоду, називають довжиною хвилі λ (м), або довжина хвилі – це

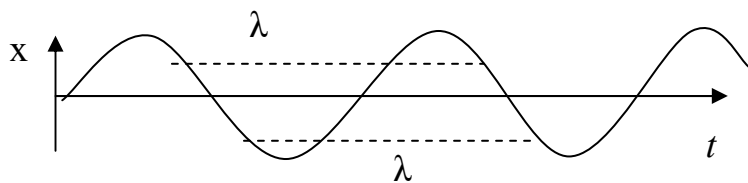


Рисунок 55

відстань між сусідніми точками хвилі, що коливаються в однакових фазах (рис.55):

$$\lambda = gT = \frac{g}{\nu}$$

Швидкість розповсюдження повздовжньої хвилі

$$g = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

де E – модуль Юнга,

ρ - густина тіла.

Швидкість розповсюдження поперечної хвилі

$$g = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

де G - модуль зсуву.

Оскільки $E > G$, то повздовжні хвилі розповсюджуються у твердому тілі швидше, ніж поперечні.

Звукові хвилі. Швидкість звуку. Гучність. Висота тону

Звук – це механічне явище, яке сприймається суб'єктивно спеціальними органами чуття людини і тварини.

Акустика розглядає інтервал частот від 16 Гц до 20000 Гц – це звуковий діапазон. Коливання, нижчі, ніж 16 Гц, називають *інфразвуками*, вищі 20 кГц – *ультразвуками*. Ультразвуки знайшли широке застосування. Маючи велику інтенсивність, звукова хвиля створює на своєму шляху значні пульсації тиску, тому ультразвук може здійснювати значний вплив (механічний, біологічний, хімічний) на знищення бактерій, активізацію хімічних реакцій; опромінювання молока ультразвуком веде до знищення молочнокислих бактерій, затримуючи процес прокисання молока на декілька діб. Ультразвуком лікують, знаходять положення суден, що затонули, визначають рельєф дна океану. Цікаво, що дельфіни сприймають звук до 30 кГц, летючі миші – до 100 кГц. Для отримання ультразвуку застосовують п'єзокварцові генератори.

Звук передається пружним середовищем у вигляді хвиль. Швидкість звуку залежить від пружних властивостей середовища, його густини та температури.

$t^{\circ} C$	0°	15°	100°
g м/с	332	342	386

середовище	повітря	Fe	скло	H_2O
g м/с	332	4900	5600	1450

Звукові хвилі розподіляють на:

удар – одиничне коливання (постріл, удар молотка);

шум – неперіодичні удари (шум моря, шум дощу);

музичні звуки – періодичні коливання, що продовжуються безперервно і переходять одне в одне (коливання струни, камертона). Музичні звуки характеризуються висотою тону, гучністю і тембром. Коливання більшої частоти відповідають високому тону і навпаки, чим нижча частота, тим нижчий тон.

Гучність - суб'єктивна якість звуку, який сприймають. Сила звуку та гучність взаємопов'язані: так, із збільшенням сили звуку зростає і гучність. Дослід показує, що сила звуку тим більша, чим більша амплітуда коливань і навпаки.

Тембр – характерне забарвлення звуку, що дає можливість розрізняти голоси людей, музичні інструменти тощо.

Приклади розв'язування задач

1. Рівняння коливань матеріальної точки масою 16 г має вигляд:
 $x = 0,1 \sin(\pi t/8 + \pi/4)$ см. Знайти: 1) максимальні значення швидкості та прискорення руху точки; 2) значення максимальної сили, що діє на точку; 3) повну енергію точки, яка коливається.

Розв'язання

Дано

$$m = 16 \text{ г} = 16 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$x = 0,1 \sin\left(\frac{\pi}{8}t + \frac{\pi}{4}\right) \text{ см} = 0,001 \sin\left(\frac{\pi}{8}t + \frac{\pi}{4}\right) \text{ м}$$

$$v_{\max} = ?, a_{\max} = ?, F_{\max} = ?, E_{\text{повн}} = ?$$

Швидкість точки можна визначити як першу похідну від зміщення:

$$v = 0,001 \frac{\pi}{8} \cos\left(\frac{\pi}{8}t + \frac{\pi}{4}\right).$$

Значення максимальної швидкості

буде якщо

$$\cos\left(\frac{\pi}{8}t + \frac{\pi}{4}\right) = 1, \text{ отже}$$

$$v_{\max} = 0,001 \frac{3,14}{8} = 0,0003925 = 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ (м/с)}.$$

Прискорення точки можна знайти як похідну від швидкості:

$$a = -0,001 \left(\frac{\pi}{8}\right)^2 \sin\left(\frac{\pi}{8}t + \frac{\pi}{4}\right).$$

Максимальне значення буде, якщо

$$\sin\left(\frac{\pi}{8}t + \frac{\pi}{4}\right) = 1, \text{ отже}$$

$$a_{\max} = -0,001 \frac{\pi^2}{64} = -1,5 \cdot 10^{-4} \text{ (м/с}^2\text{)}.$$

Значення максимальної сили знайдемо:

$$F_{\max} = m a_{\max} = -0,016 \cdot 10^{-4} = -2,46 \cdot 10^{-6} \text{ (Н)}.$$

Значення повної енергії знайдемо:

$$E_{\text{повн}} = \frac{mA^2\omega^2}{2} = \frac{0,016 \cdot (0,001)^2 \cdot \left(\frac{\pi}{8}\right)^2}{2} = 1,23 \cdot 10^{-10} \text{ Дж.}$$

Відповідь: $\mathcal{G}_{\text{max}} = 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$; $a_{\text{max}} = -1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2$;

$$F_{\text{max}} = -2,46 \cdot 10^{-6} \text{ Н}; E_{\text{повн}} = 1,23 \cdot 10^{-10} \text{ Дж.}$$

2. Один маятник здійснив 10 коливань, другий за цей же час – 6 коливань. Різниця довжин маятників 16 см. Знайти довжини маятників.

Розв'язання

Дано
 $N_1 = 10$
 $t_1 = t_2$
 $N_2 = 6$
 $l_2 - l_1 = 16 \text{ см} =$
 $= 0,16 \text{ м}$
 $l_1 = ?$ $l_2 = ?$

За умовою задачі $t_1 = t_2$. Час всіх коливань: $t = TN_1$,
де T – період коливань, N – кількість коливань:

$$T_1 N_1 = T_2 N_2,$$

$$2\pi \sqrt{\frac{l_1}{g}} \cdot N_1 = 2\pi \sqrt{\frac{l_2}{g}} \cdot N_2.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} l_1 \cdot N_1^2 = l_2 \cdot N_2^2 \\ l_2 - l_1 = 0,16 \end{array} \right\}, \text{ звідки } l_2 = 0,16 + l_1.$$

Розв'яжемо систему рівнянь:

$$l_1 N_1^2 = (0,16 + l_1) N_2^2,$$

$$l_1 \cdot 100 = (0,16 + l_1) \cdot 36,$$

$$100l_1 = 5,76 + 36l_1,$$

$$64l_1 = 5,76,$$

$$l_1 = 0,09 \text{ (м)}, \quad l_2 = 0,25 \text{ (м)}.$$

Відповідь: $l_1 = 0,09 \text{ м}$; $l_2 = 0,25 \text{ м}$.

3. Якщо пружину з тягарцем розтягнути на 4 см і надати швидкості 3 м/с, то положення рівноваги він пройде зі швидкістю 5 м/с. Знайти циклічну частоту коливань такого маятника.

Розв'язання

Дано
 $x = 4 \text{ см} = 0,04 \text{ м}$
 $\mathcal{G}_1 = 3 \text{ м/с}$
 $\mathcal{G}_{\text{max}} = 5 \text{ м/с}$
 $\omega = ?$

Повна енергія точки, яка коливається, дорівнює:

$$E_{\text{повна}} = E_{\text{кін.}} + E_{\text{потенц.}} = \frac{m\mathcal{G}_1^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = \frac{m\mathcal{G}_{\text{max}}^2}{2},$$

оскільки $k = m\omega^2$, то $m\mathcal{G}_1^2 + m\omega^2 x^2 = m\mathcal{G}_{\text{max}}^2$,

$$\mathcal{G}_1^2 + \omega^2 x^2 = \mathcal{G}_{\text{max}}^2,$$

$$\omega = \sqrt{\frac{\mathcal{G}_{\text{max}}^2 - \mathcal{G}_1^2}{x^2}} = \sqrt{\frac{25 - 9}{0,04^2}} = \sqrt{10^4} = 100 \text{ рад/с.}$$

Відповідь: $\omega = 100 \text{ рад/с}$.

4. Визначити довжину хвилі при частоті 200 Гц, якщо швидкість розповсюдження хвиль 340 м/с. Визначити швидкість звуку у воді, якщо

джерело, що коливається з періодом 0,002 с, збуджує у воді хвилі довжиною 2,9 м.

Розв'язання

Дано $\nu_1 = 200 \text{ Гц}$ $\vartheta_1 = 340 \text{ м/с}$ $T_2 = 0,002 \text{ с}$ $\lambda_2 = 2,9 \text{ м}$ $\vartheta_2 = ? \quad \lambda_1 = ?$	Довжина хвилі обчислюється: $\lambda_1 = \frac{\vartheta_1}{\nu_1} = \frac{340}{200} = 1,7 \text{ м,}$ $\vartheta_2 = \frac{\lambda_2}{T_2} = \frac{2,9}{0,002} = 1450 \text{ м/с.}$
--	---

Відповідь: $\lambda_1 = 1,7 \text{ м}$; $\vartheta_2 = 1450 \text{ м/с}$.

Задачі для самостійного розв'язання

1. Рівняння руху точки, що коливається, має вигляд $x = 10 \sin 20\pi t$ см. Визначити амплітуду, період і частоту коливань; зміщення при $t = T/8$.
Відповідь: $A = 10 \text{ см}$; $T = 0,1 \text{ с}$; $\nu = 10 \text{ Гц}$; $x = 7 \text{ см}$.
2. Записати рівняння гармонічних коливань з амплітудою 5 см, якщо за 1 хв здійснюється 150 коливань, а початкова фаза 45° . Накреслити графік цього коливання.
Відповідь: $x = A \sin (5\pi t + \pi/4)$.
3. Математичний маятник довжиною 1 м підвішений в ліфті. Який буде період коливань маятника, якщо ліфт піднімається з прискоренням $1,8 \text{ м/с}^2$; опускається з таким же прискоренням?
Відповідь: 1,84 с; 2,22 с.
4. Тягарець масою 100 г здійснює певну кількість коливань протягом 4 с. На скільки треба змінити масу тягарця, щоб ця ж кількість коливань була виконана протягом 6 с ?
Відповідь: 0,125 кг.
5. Кулька масою 50 г підвішена до двох послідовно з'єднаних пружин, жорсткість яких 10 Н/м і 40 Н/м. Знайти частоту коливань такого маятника.
Відповідь: 2 Гц.
6. Катер рухається у морі зі швидкістю 54 км/год. Відстань між гребнями хвиль 10 м, період коливань частинок води хвилі 2 с. З якою частотою вдаряються хвилі в корпус катера при його русі в напрямку розповсюдження хвиль? назустріч хвилям?
Відповідь: 2 Гц; 1 Гц.
7. Через який проміжок часу після початку коливань зміщення точки від положення рівноваги буде дорівнювати половині амплітуди, якщо період коливань 24 с, а початкова фаза дорівнює нулю.
Відповідь: 2 с.
8. Математичний маятник довжиною 2,5 м здійснює гармонічні коливання. Найбільша швидкість коливань дорівнює 5 м/с. На який найбільший кут відхиляється маятник.

Відповідь: 60°.

4.1. Електромагнетні коливання

Систему, яка складається з конденсатора ємністю C і котушки індуктивності L , в якій можуть виникати електромагнетні коливання, називають коливальним контуром (рис.56). Електромагнетними коливаннями називають періодичні взаємопов'язані зміни зарядів, струмів, напруг електричного і магнетного полів. Вільні електромагнетні коливання контуру є гармонічними з періодом: $T=2\pi\sqrt{LC}$. Дану формулу вивів

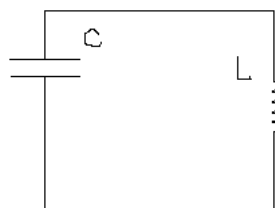


Рисунок 56

англійський фізик У. Томсон.

Циклічна частота вільних електромагнетних коливань у контурі:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}.$$

Якщо заряд конденсатора з часом змінюється за гармонічним законом:

$$q = q_0 \cos \omega_0 t,$$

то й сама сила струму в коливальному контурі змінюється за гармонічним законом:

$$I = I_0 \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right),$$

де $I_0 = \omega_0 q_0$.

Коливання сили струму зміщені за фазою на $\pi/2$ відносно коливань заряду.

Під час вільних коливань у контурі відбувається взаємне перетворення енергії електричного поля в енергію магнетного поля. Якщо не існує втрат, то повна енергія:

$$W = \frac{CU^2}{2} + \frac{LI^2}{2} = const.$$

Приклади розв'язування задач

1. Максимальний струм в коливальному контурі дорівнює 5 мА. Знайти циклічну частоту власних коливань, якщо при силі струму 3 мА заряд на конденсаторі дорівнює 2 мКл.

<p>Дано</p> <p>$I_0 = 5 \text{ мА} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ А}$</p> <p>$I = 3 \text{ мА} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ А}$</p> <p>$q = 2 \text{ мКл} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}$</p> <hr style="border: 0.5px solid black;"/> <p>$\omega = ?$</p>	<p style="text-align: center;"><i>Розв'язування</i></p> <p>Заряд на конденсаторі в коливальному контурі обчислюється:</p> $q = q_0 \sin(\omega t + \varphi_0). \tag{1}$
--	---

Сила струму обчислюється:

$$I = I_0 \cos(\omega t + \varphi_0),$$

де $I_0 = q_0 \omega$, звідки

$$\omega = \frac{I_0}{q_0}. \quad (2)$$

Розв'язуючи рівняння (1) і (2), знайдемо q_0 :

$$\frac{q^2}{q_0^2} = \sin^2(\omega t + \varphi_0),$$

$$\frac{I^2}{I_0^2} = \cos^2(\omega t + \varphi_0),$$

$$\frac{q^2}{q_0^2} + \frac{I^2}{I_0^2} = 1,$$

звідки $q_0 = \sqrt{\frac{q^2}{1 - \frac{I^2}{I_0^2}}} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ Кл, тоді $\omega = \frac{I_0}{q_0} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{2,5 \cdot 10^{-3}} = 2$ рад/с.

Відповідь: 2 рад/с.

2. Індуктивність коливального контуру 500 мкГн. Потрібно налаштувати даний контур на частоту 1 МГц. Яку ємність потрібно вибрати?

Розв'язування

Дано

$$L = 500 \text{ мкГн} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$$

$$\nu = 1 \text{ МГц} = 10^6 \text{ Гц}$$

$$C = ?$$

Виходячи з формули Томсона, знайдемо C :

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

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

звідки

звідки $C = \frac{1}{\nu^2 4\pi^2 L} = 50$ пФ

Відповідь: 50 пФ.

3. Миттєві значення енергії електричного і магнетного поля коливального контуру відповідно дорівнюють 4 мкДж і 6 мкДж. Амплітуда сили струму в контурі 120 мА. Чому дорівнює індуктивність котушки в контурі?

Розв'язування

Дано

$$W_e = 4 \text{ мкДж} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}$$

$$W_m = 6 \text{ мкДж} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}$$

$$I_0 = 120 \text{ мА} = 120 \cdot 10^{-3} \text{ А}$$

$$L = ?$$

Повна енергія контуру:

$$W = W_e + W_m$$

$$W = 4 \cdot 10^{-6} + 6 \cdot 10^{-6} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ Дж.}$$

Максимальна енергія контуру дорівнює:

$$W = \frac{LI_0^2}{2},$$

звідки $L = \frac{2W}{I_0^2} = \frac{2 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{120^2 \cdot 10^{-6}} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} = 1,4 \text{ мГн.}$

Відповідь: 1,4 мГн.

4. Магнетний потік у рамці, яка має 1000 витків і рівномірно обертається в однорідному магнетному полі, змінюється за законом $\Phi = 10^{-4} \cos 3,14t$.
Визначити максимальне та діюче значення ЕРС, частоту струму.

Дано
 $\Phi = 10^{-4} \cos 3,14t$
 $n = 1000$

$E_{max}=?$, $E_{\delta}=?$, $\nu=?$

За законом електромагнетної індукції: $E = -\Delta\Phi/\Delta t$,
для визначення ЕРС знайдемо похідну виразу, що описує залежність магнетного потоку від часу:

$$E_1 = -\Phi'(t) = -(10^{-4} \cdot 3,14 \sin 3,14t);$$

для n витків $E = n E_1$:

$$E_{max} = 1000 \cdot (10^{-4} \cdot 3,14 \sin 3,14t) = 0,314 \sin 3,14t.$$

Порівнюючи знайдений вираз із виразом для описання гармонічних коливань $x = A \sin \omega t$, отримаємо $E_{max} = 0,314 \text{ В}$;

Діюче значення ЕРС: $E_{\delta} = \frac{E}{\sqrt{2}}$,

$E_{\delta} = 0,707 \cdot 0,314 = 0,222 \text{ В}$, $\omega = 2\pi/T = 3,14$; звідки $\nu = 3,14/2\pi = 0,5 \text{ Гц}$.
Відповідь: $E_{max} = 0,314 \sin 3,14t$; $E_{\delta} = 0,222 \text{ В}$; $\nu = 0,5 \text{ Гц}$.

Задачі для самостійного розв'язання

1. Визначити частоту коливань в контурі з котушкою індуктивності 1,5 мГн та конденсатором ємністю 450 пФ.

Відповідь: 19,4 кГц.

2. Як змінюється частота коливань контуру, якщо його індуктивність збільшити в 10 разів, а ємність зменшити в 2,5 раза?

Відповідь: $\nu_2/\nu_1 = 0,5$.

3. Амплітуда заряду конденсатора коливального контуру 4 нКл, а амплітуда сили струму в котушці - 0,5 А. Знайти період коливань в цьому контурі.

Відповідь: 50 нс.

4. На якій частоті судна передають сигнал біди SOS, якщо за міжнародним домовленням довжина радіохвилі повинна бути 600 м?

Відповідь: 0,5 МГц.

5. На якій довжині хвиль працює радіопередавач, якщо його коливальний контур має ємність 2,6 пФ та індуктивність 0,012 мГн?

Відповідь: 10,5 м.

6. Коливальний контур створює в повітрі електромагнетні хвилі довжиною 150 м. Яка ємність ввімкнена в контур, якщо його індуктивність 0,25 мГн? Активним опором контуру знехтувати.

Відповідь: 25,3 пФ.

7. Знайти період коливань в коливальному контурі, якщо максимальний заряд конденсатора 10 нКл, а максимальний струм 10 мА.

Відповідь: 6,28 мкс.

8. На яку довжину хвилі резонує коливальний контур, якщо амплітуда заряду на обкладках конденсатора 2 нКл, амплітуда сили струму 0,3 А?

Відповідь: 12,56 м.

5 ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

Під час вивчення явищ, у яких тіла рухаються із швидкістю, яка наближається до швидкості поширення світла, було встановлено, що закони класичної механіки для цих явищ не справджуються. Тому для тіл, які рухаються із швидкостями, близькими до швидкості світла у вакуумі, закони класичної механіки мають бути змінені іншими, загальнішими, які враховують особливості такого руху, тобто законами релятивістської механіки. В основі цих законів лежать нові уявлення про простір і час. Перегляд уявлень про властивості простору і часу привело до створення на початку ХХ ст. спеціальної теорії відносності. В основі теорії відносності лежать положення, які формулюють у вигляді двох постулатів: принципу відносності і принципу сталості швидкості світла. Ці постулати в 1905 році вперше сформулював відомий фізик А. Ейнштейн:

1) у будь-якій інерціальній системі будь-які фізичні явища протікають однаково, тобто в усіх інерціальних системах відліку фізичні закони мають однакову форму. Ніякими вимірюваннями, проведеними в інерціальній системі відліку, неможливо виявити рух цієї системи;

2) швидкість світла у вакуумі є величина стала і однакова в усіх інерціальних системах відліку, вона не залежить від швидкості руху джерела світла і спостерігача.

Наслідки постулатів теорії відносності

1. Відносність одночасності: дві просторово розділені події одночасно в одній інерціальній системі відліку можуть не бути одночасними в іншій інерціальній системі відліку. При переході з однієї інерціальної системи відліку в іншу може змінюватися послідовність подій у часі, проте послідовність причин зв'язаних подій залишається незмінною в усіх системах відліку. Наслідок настає завжди після причини;

2. Швидкість світла у вакуумі є максимально можливою швидкістю передачі взаємодії:

$$C = 299792458 \text{ м/с або} \\ C \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

3. Відносність відстаней: відстань між двома будь-якими точками простору – не абсолютна величина, вона залежить від швидкості руху тіла відносно даної системи відліку.

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{g^2}{c^2}} = l_0 \sqrt{1 - \beta^2},$$

де $\beta^2 = \frac{g^2}{c^2}$

l_0 - довжина нерухомого предмета,

l - довжина рухомого предмета,

g – швидкість руху предмета в даній системі відліку.

Отже, довжина l рухомого предмета скорочується в напрямі руху.

Розміри предметів у напрямі, перпендикулярному до напрямку руху, не змінюються.

4. Відносність проміжків часу: тривалість самої події в різних інерціальних системах відліку неоднакова.

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

де τ_0 – інтервал часу в нерухомій системі;

τ – інтервал часу вимірний у системі, що рухається з швидкістю \mathcal{V} .

Тривалість події, що відбувається в деякій точці простору, найменша в інерціальній системі, відносно якої дана точка нерухома.

5. Релятивістський закон додавання швидкостей:

$$\mathcal{V}_2 = \frac{\mathcal{V} + \mathcal{V}_1}{1 + \frac{\mathcal{V}_1 \mathcal{V}}{c^2}},$$

де \mathcal{V}_1 - швидкість тіла в одній системі відліку,

\mathcal{V}_2 - швидкість того самого тіла в другій системі відліку,

\mathcal{V} - швидкість руху цих систем відліку одна відносно одної.

Якщо $\mathcal{V} \ll c$ і $\mathcal{V}_1 \ll c$, отримуємо класичний закон додавання швидкостей:

$$\mathcal{V}_2 = \mathcal{V}_1 + \mathcal{V}.$$

Які б не були великими швидкості \mathcal{V}_1 і \mathcal{V} , результуюча швидкість \mathcal{V}_2 не перевищує швидкості світла c .

6. Релятивістський зв'язок між масою і енергією: в релятивістській динаміці маса тіла m залежить від швидкості його руху:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

де m_0 – маса нерухомого тіла,

m - маса того ж самого тіла, яке рухається зі швидкістю \mathcal{V} .

Маса тіла, що рухається, більша за масу нерухомого тіла. Тоді імпульс рухомого тіла:

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{\mathcal{V}}}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Енергія тіла E прямо пропорційна релятивістській масі цього тіла:

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

$E_0 = mc^2$ - власна енергія або енергія спокою.

При збільшенні енергії будь-якої нерухомої системи на ΔE її маса також зростає на:

$$m_0 = \frac{\Delta E_0}{c^2}.$$

Приклади розв'язування задач

1. Два тіла рухаються відносно нерухомого спостерігача рівномірно і прямолінійно у протилежних напрямках із швидкостями $g_1 = 0,8c$ та $g_2 = -0,5c$. Визначити відносні швидкості цих тіл за класичними і релятивістськими співвідношеннями.

Розв'язання

Дано $g_1 = 0,8c$ $g_2 = -0,5c$ $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ $U_k - ?$ $U_p - ?$	За класичним законом додавання швидкостей: $U_k = g_1 - g_2 = 0,8c - (-0,5c) = 1,3c.$ Даний результат суперечить спеціальній теорії відносності. (Швидкість світла у вакуумі є максимальною можлива). За релятивістським законом додавання швидкостей:
---	---

$$U_p = \frac{g + g_1}{1 + \frac{g_1 g}{c^2}} = \frac{0,8 + 0,5c}{1 + \frac{0,8 \cdot 0,5c^2}{c^2}} = 0,93c = 280000 \text{ км/с}.$$

Відповідь: відносна швидкість $U_p = 280000 \text{ км/с}$, не суперечить постулатам теорії відносності.

2. Маса спокою зарядженої частинки $1,6 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$. Визначити кінетичну енергію при швидкості, яка дорівнює $0,6c$.

Розв'язання

Дано $m_0 = 1,6 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ $g = 0,6c$ $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ $E_k - ?$	Кінетична енергія частинки, що рухається з швидкістю $0,6c$, визначається: $E_k = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{g^2}{c^2}}} - 1 \right) = 1,6 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{0,36c^2}{c^2}}} - 1 \right) =$ $= 36 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}.$
--	---

Відповідь: $E_k = 36 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}$.

3. Протон рухається із швидкістю $0,7c$. Знайти його імпульс і кінетичну енергію.

Розв'язання

Дано $m_0 = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ $g = 0,7c$ $E_k - ?$ $p - ?$	$p = \frac{m_0 g}{\sqrt{1 - \frac{g^2}{c^2}}} = \frac{m_0 \cdot 0,7 \cdot c}{\sqrt{1 - 0,7^2}} = \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 0,7 \cdot 3 \cdot 10^8}{\sqrt{1 - 0,49}} =$ $= 4,91 \cdot 10^{-19} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$
--	---

$$E_k = m_0 c^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{g^2}{c^2}}} - 1 \right) = 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - 0,7^2}} - 1 \right) = 0,6 \cdot 10^{-10} \text{ Дж.}$$

Відповідь: $E_k = 0,6 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}$, $p = 4,91 \cdot 10^{-19} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$.

4. Іонізований атом, вилетівши з прискорювача із швидкістю 0,89 с, випустив фотон у напрямі свого руху. Визначити швидкість фотона відносно прискорювача.

Розв'язання

Дано $g_1 = 0,89 \text{ с}$	Запишемо формулу релятивістського додавання швидкостей:	$g_2 = \frac{g + g_1}{1 + \frac{g_1 g}{c^2}}$
$g_2 - ?$	Тут $g = c$.	

З врахуванням цього отримаємо: $g_2 = \frac{0,89 \cdot c + c}{1 + \frac{0,98 \cdot c \cdot c}{c^2}} = c$

Відповідь: $g_2 = c$.

Задачі для самостійного розв'язання

1. Тіло рухається відносно рухомої системи відліку зі швидкістю $g_1 = 0,2 \text{ с}$, а відносно нерухомої системи відліку зі швидкістю $g_2 = 0,8 \text{ с}$, c – швидкість світла у вакуумі. З якою швидкістю рухається система відліку одна відносно другої?

Відповідь: $g = 214300 \text{ км/с}$.

2. Якщо енергія світлового імпульсу дорівнює $9 \cdot 10^7 \text{ Дж}$, то чому дорівнює його маса?

Відповідь: $m = 10^{-23} \text{ кг}$.

3. Який об'єм тіла, що рухається зі швидкістю 0,6 с, коли його об'єм у стані спокою $8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$?

Відповідь: $10 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$.

4. Маса спокою електрона $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$. Визначити кінетичну енергію при швидкості, яка дорівнює 0,8 с.

Відповідь: $54,6 \cdot 10^{-15} \text{ Дж}$.

5. Нейтрон – нестабільна частинка: вона розпадається на протон, електрон і антинейтрино. Нехай нейтрон перебуває в спокої, тоді швидкість електрона, що виникає під час розпаду, становить 0,8 с. Якою буде швидкість електрона, коли розпадається нейтрон, що рухається в тому самому напрямі зі швидкістю 0,9 с?

Відповідь: 0,98 с.

6 ОПТИКА

Розвиток поглядів на природу світла

Оптика - розділ фізики, в якому вивчають природу світла, закономірності світлових явищ і процеси взаємодії світла з речовиною.

З кінця XVII ст. в оптиці йшла боротьба між корпускулярною і хвильовою теоріями світла. За корпускулярною теорією, яку підтримав Ньютон, світло – це потік частинок, який рухається від джерела і при цьому переноситься речовина. З такою теорією добре узгоджувалися відомі на той час закони прямолінійного поширення світла і закони відбивання. Дана теорія пояснювала і закон заломлення світла, причому з неї випливало, що в густішому середовищі світло поширюється з більшою швидкістю, ніж у менш густому. За хвильовою теорією, якою керувався Гюйгенс, світло – це поширення хвиль в особливому середовищі – ефірі. Дана теорія дещо була формальною. Вона не пояснювала основного закону – закону прямолінійного поширення світла, її автор не вживав навіть поняття довжини хвилі. Цих дві теорії суперечили між собою. На основі сучасних уявлень світло має подвійну корпускулярно–хвильову природу (корпускулярно-хвильовий дуалізм): з одного боку, воно має хвильові властивості (явища інтерференції, дифракції, поляризації), з другого – це потік частинок – фотонів, які мають нульову масу спокою і рухаються зі швидкістю, яка дорівнює швидкості світла у вакуумі.

6.1 Геометрична оптика

Геометрична оптика – це розділ фізики, який вивчає закони поширення світла в прозорих середовищах. Умови застосування геометричної оптики: довжина світлової хвилі значно менша порівняно з характерними розмірами перешкод. У геометричній оптиці розглядаються закони поширення світла в прозорих середовищах на основі уявлення про світло як сукупність *світлових променів*. Промінь – це лінія, дотична до якої в кожній точці збігається з напрямом поширення хвилі. Напрямок поширення хвилі збігається з напрямом поширення енергії.

Закони геометричної оптики

1. Закон прямолінійного поширення світла: в однорідному середовищі світло поширюється прямолінійно. Даний закон дає змогу визначити

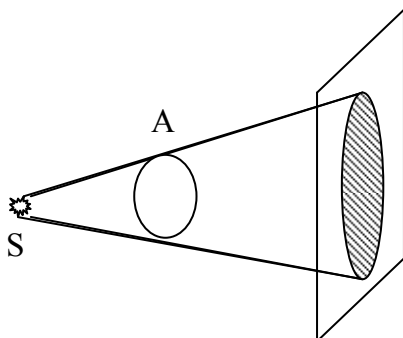


Рисунок 57

області тіні і напівтіні від джерел світла. Тінь має різко окреслені межі, якщо джерело S точкове, тобто якщо його розмірами можна знехтувати порівняно з відстанню до освітлювального предмета. Якщо джерело не точкове, то тінь буде невиразною, вона має розмитий край, який називається півтіню (рис. 57).

S – джерело, *A* – тіло.

2. Закон відбиття.

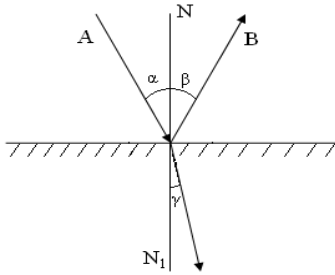


Рисунок 58

Падаючий промінь і перпендикуляр до межі розділу двох середовищ, поставлений у точці падіння, лежить в одній площині, кут падіння α дорівнює куту відбиття β (рис. 58).

Кут між напрямом падаючого променя і нормаллю NN_1 до межі поділу називають кутом падіння α , кут між відбитим променем і нормаллю NN_1 – кутом відбиття β .

Гладенькі тіла, які відбивають світло в одному напрямі, називають дзеркалами, поверхні дзеркальними (рис. 59).

Якщо паралельність променів не зберігається, відбувається розсіювання світла, яке називається дифузним розсіюванням (рис. 60).

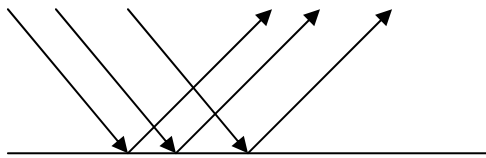


Рисунок 59

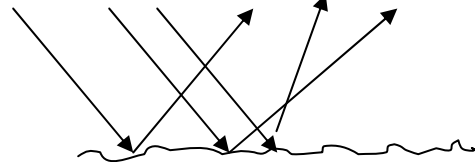


Рисунок 60

3. Закони заломлення світла:

- 1) падаючий і заломлений промені і нормаль до межі поділу лежать в одній площині;
- 2) відношення синуса кута падіння α до синуса кута заломлення γ дорівнює відношенню швидкостей поширення світла в цих середовищах:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{g_1}{g_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21},$$

де g_1 і g_2 – швидкості поширення світла в середовищах, показники заломлення яких n_1 і n_2 .

Величину $n_{2,1}$ називають відносним показником заломлення або показником заломлення другого середовища відносно першого. Він показує, у скільки разів швидкість світла у першому середовищі більша або менша від швидкості світла в другому. Якщо першим середовищем є вакуум, то $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{c}{g} = n$ - абсолютний показник заломлення, який показує,

у скільки разів швидкість світла у вакуумі більша, ніж у даному середовищі. Середовище з більшим показником заломлення називається оптично більш густим. Якщо світло переходить з оптично більш густого середовища в менш густе, то кут заломлення більший від кута падіння $\gamma > \alpha$ (рис. 61).

Якщо світло переходить з оптично густішого середовища в оптично менш густе, то, починаючи з деякого кута падіння α_0 , світло повністю відбивається від поверхні розділу цих двох середовищ. Кут падіння α , що

відповідає куту заломлення $\beta_0 = 90^\circ$, називають граничним кутом повного відбиття. В цьому випадку $\gamma = 90^\circ$, $\sin \gamma = 1$, отже: $\sin \alpha_0 = \frac{1}{n_{2,1}}$.

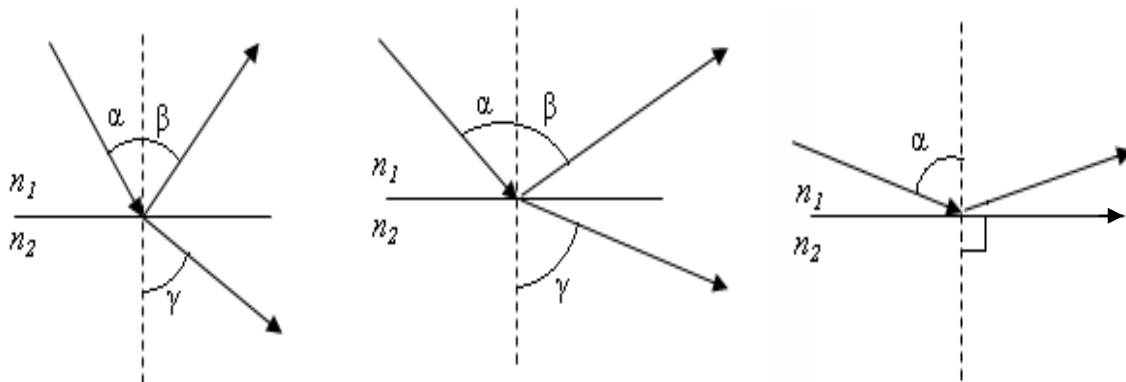


Рисунок 61

Явище повного внутрішнього відбиття використовується у світловодах, прозорих гнучких волокнах, в яких світло може поширюватися криволінійно.

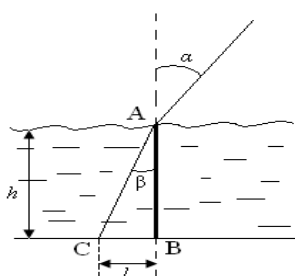
Світловоди використовують в електронно-променевих трубках, в електронно-лічильних машинах для кодування інформації, в медицині для діагностики органів.

Приклади розв'язування задач

- У дно ставка вертикально забито палю так, що вона повністю ховається під водою. Визначити довжину тіні на дні ставка, якщо його глибина 2 м, а кут падіння променів 45° .

Дано
 $n=1,33$
 $\alpha=45^\circ$
 $h=2\text{ м}$
 $l=?$

Розв'язання
 Використаємо закон заломлення світла при переході з одного середовища в інше: $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$.



Звідки:

$$\sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n} = \frac{\sin 45^\circ}{1,33} = 0,531,$$

$$\beta = \arcsin 0,531 = 32^\circ.$$

Із ΔCAB визначимо довжину тіні:

$$\frac{CB}{AB} = \operatorname{tg} \beta, \quad \frac{l}{h} = \operatorname{tg} \beta,$$

$$l = h \cdot \operatorname{tg} \beta = 2 \cdot \operatorname{tg} 32^\circ = 2 \cdot 0,625 = 1,25 \text{ м.}$$

Відповідь: $l=1,25$ м.

- На горизонтальному дні озера глибиною 1,8 м лежить плоске дзеркало. На якій відстані S від місця входження променя у воду цей промінь

знову вийде на поверхню води після відбивання від дзеркала? Кут падіння променя 30° .

Дано
 $h=1,8$ м
 $\alpha=30^\circ$
 $n=1,33$
 $x=?$

Розв'язання
 Зробимо рисунок і визначимо за законом заломлення кут заломлення променя.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n, \quad \sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n}$$

З трикутника ACB

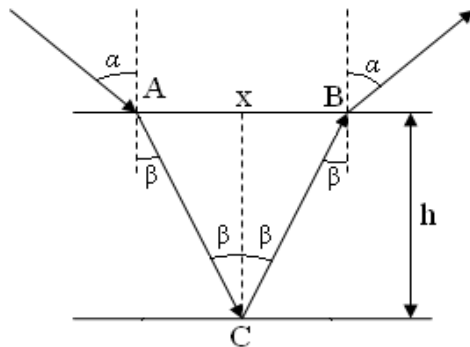
$$x = AB = 2h \cdot \operatorname{tg} \beta,$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sin \beta}{\cos \beta},$$

тоді

$$x = \frac{2h \cdot \sin \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}},$$

$$x = \frac{2 \cdot 1,8 \cdot 0,5}{\sqrt{(1,33)^2 - (0,5)^2}} = 1,45 \text{ м.}$$



Відповідь: 1,45 м.

3. Водолаз розглядає з-під води предмет, що перебуває майже над його головою на відстані 150 см від води. Якою йому здаватиметься відстань від предмета до води?

Дано
 $n=1,33$
 $h=1,5$ м
 $h_1=?$

Розв'язання
 В нашій задачі S_1O – уявна висота предмета над водою.
 Кут $BS_1O = \beta$, кут $BSO = \alpha$.

Тоді з
 $\triangle BOS$: $OB = OS \cdot t$

З
 $\triangle BOS_1$: $OB = OS_1 \cdot \operatorname{tg} \beta = h_1 \cdot \operatorname{tg} \beta$.

Прирівнявши:
 $h \cdot \operatorname{tg} \alpha = h_1 \cdot \operatorname{tg} \beta$.

Звідки: $h = \frac{h_1 \cdot \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha}$.

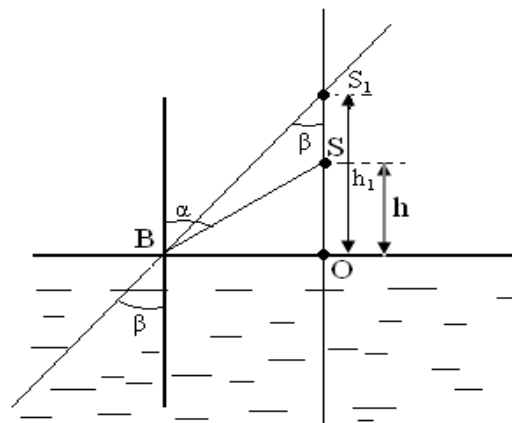
Для малих кутів $\operatorname{tg} \beta \approx \sin \beta$,

тоді $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$.

Отже, $h_1 = h \cdot n = 1,5 \cdot 1,33 = 2$ м.

Відповідь: 2 м.

4. Промінь світла виходить з діелектрика у вакуум. Граничний кут дорівнює 42° . Визначити швидкість світла в діелектрику.



Дано

$$\alpha = 42^\circ$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$g - ?$$

Розв'язання

Швидкість світла в діелектрику визначимо через абсолютний показник заломлення діелектрика.

$$g = \frac{c}{n}$$

Враховавши граничний кут повного внутрішнього відбиття, отримаємо:

$$\sin \alpha = \frac{1}{n}, \text{ тоді } g = c \cdot \sin \alpha$$

$$g = 3 \cdot 10^8 \cdot 0,674 = 2,02 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Відповідь: $2,02 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

Задачі для самостійного розв'язання

1. Промінь світла напрямлений з повітря на поверхню рідини під кутом 40° . Кут заломлення дорівнює 24° . Який буде кут заломлення, якщо промінь падає під кутом 80° ?

Відповідь: 38° .

2. Промінь світла падає з води на поверхню поділу води й повітря під кутом 50° . Визначити кут заломлення променя у повітрі.

Відповідь: заломлення не буде.

3. Промінь падає під кутом 60° на скляну пластину завтовшки 2 см з паралельними гранями. Визначити зміщення променя, який вийшов з пластини.

Відповідь: 1,2 см.

4. Водолазові, який перебуває під водою, здається, що сонячні промені падають під кутом 60° до поверхні води. Яка кутова висота Сонця над горизонтом?

Відповідь: 49° .

5. Хлопчик намагається влучити палицею в предмет, що лежить на дні струмка завглибшки 40 см. На якій відстані від предмета палиця впаде на дно струмка, якщо хлопчик, точно прицілившись, кине палицю під кутом 45° до поверхні води?

Відповідь: 14 см.

6. Граничний кут падіння при переході променя із скипидару в повітря дорівнює $42^\circ 23'$. Чому дорівнює швидкість поширення світла у скипидарі?

Відповідь: $2,01 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

7. Граничний кут повного відбиття для деякої речовини (на межі з повітрям) дорівнює 30° . Визначити показник заломлення цієї речовини. Чому дорівнюватиме граничний кут повного відбиття для цієї самої речовини на межі з етиловим спиртом?

Відповідь: $n = 2, \alpha_{\text{гр}} = 39^\circ$.

6.1.1 Оптичні системи. Побудова зображень

Оптичною системою називають сукупність відбиваних і заломлених поверхонь, розміщених на шляху слідування світлового променя. Оптична система може давати дійсне або уявне зображення. Якщо промені, які йдуть від точкового джерела, після проходження оптичної системи збігаються в деякій точці, то така точка є *дійсним* зображенням джерела. Якщо промені, які пройшли оптичну систему, утворюють розбіжний пучок, тобто не перетинаються, а щоб знайти зображення джерела, доводиться продовжувати розбіжний пучок у напрямі, протилежному напрямку поширення світла, то утворене зображення називають *уявним*.

Найпростішою оптичною системою є *плоске дзеркало*. Зображення предмета в плоскому дзеркалі розміщено симетрично реальному предмету відносно площини дзеркала. Зображення в плоскому дзеркалі – уявне, розмір зображення дорівнює розміру предмета, зображення і предмет розміщені симетрично відносно плоского дзеркала (рис. 62).

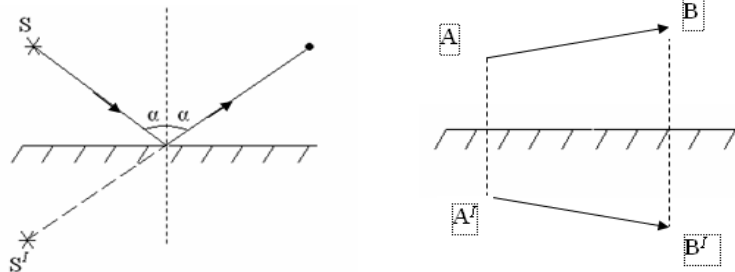


Рисунок 62

Сферичне дзеркало – тіло, що має сферичну поверхню і дзеркально відбиває світло (рис.63).

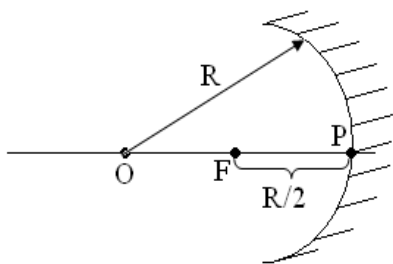


Рисунок 63

Оптичний центр дзеркала (O) – точка, проходячи через яку, промінь повертається після відбиття у зворотному напрямі.

Полус сферичного дзеркала (P) – середина дзеркала, вершина сферичного сегмента.

Фокусна відстань (FP) – відстань від полюса дзеркала до головного фокуса F.

Головний фокус дзеркала – точка (F), у якій після відбиття перетинаються всі промені, що падають паралельно головній оптичній осі.

Головна оптична вісь – пряма (OP), яка проходить через центр сферичної поверхні і полюс дзеркала.

Побічна оптична вісь – будь-яка пряма, що проходить через оптичний центр дзеркала.

Фокальна площина - площина, перпендикулярна до головної оптичної осі, яка проходить через головний фокус. Якщо радіус сфери R , то фокусна відстань:

$$F = \frac{R}{2}.$$

Величину D , обернену до фокусної відстані, називають оптичною силою:

$$D = \frac{1}{F}.$$

Вимірюється в діоптріях:

$$1 \text{ Дптр} = \frac{1}{\text{м}}.$$

Формулою сферичного дзеркала називають таке співвідношення:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} = \frac{2}{R},$$

де d – відстань від предмета до дзеркала,
 f – відстань від дзеркала до зображення,
 F – фокусна відстань,
 R – радіус сфери.

В даній формулі відстані до дійсних точок треба брати зі знаком плюс, а до уявних – зі знаком мінус.

Для побудови зображень у сферичному дзеркалі потрібно взяти будь-які з двох променів (рис. 64).

1. Промені AO і BO , які проходять через центр O дзеркала (після відбивання вони протилежно направлені відносно початкового променя).

2. Промені AF і BF , які проходять через фокус F дзеркала (після відбивання вони поширюються паралельно головній оптичній осі).

3. Промені BD і AF паралельні головній оптичній осі (після відбивання від дзеркала, вони проходять через його фокус).

4. Промені AP і BP , які падають у полюс P дзеркала (вони відбиваються симетрично головній оптичній осі).

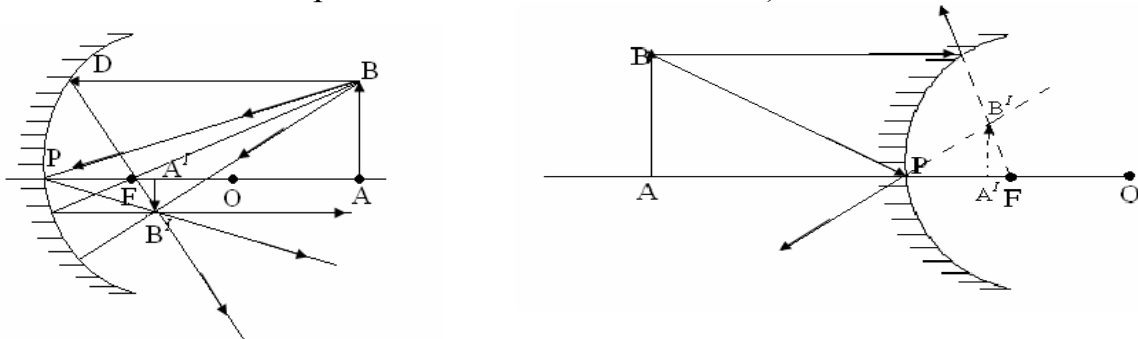


Рисунок 64

Лінзою називають прозоре тіло, обмежене двома сферичними поверхнями, причому одна з них може бути плоскою. Лінза називається тонкою, якщо її товщина мала порівняно з радіусом кривизни поверхонь.

Лінза, товщина якої на краях менша, ніж на середині, називається збиральною. Лінза, краї якої товщі за середину, називається розсіювальною (рис. 65).

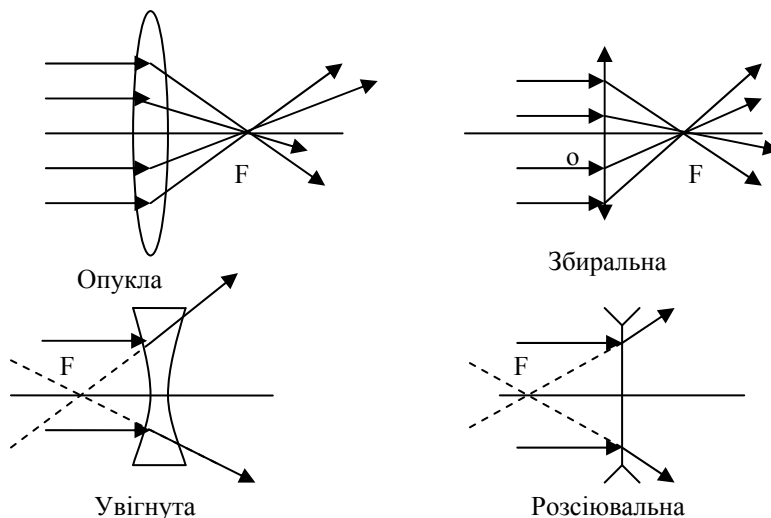


Рисунок 65

Пряма, що проходить через центри сферичних поверхонь, які обмежують лінзу, – головна оптична вісь (рис. 66).

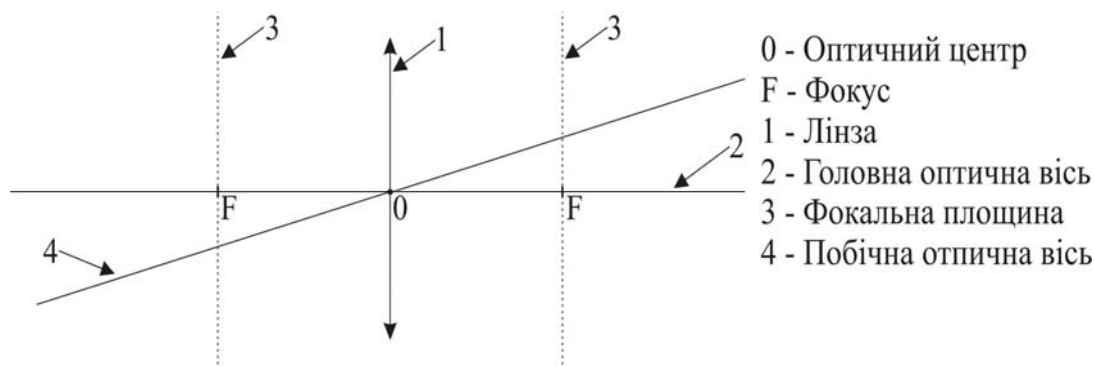


Рисунок 66

Будь-яка пряма, що проходить через оптичний центр лінзи, – побічна оптична вісь. Головний фокус лінзи – це точка, у якій після заломлення в збиральній лінзі перетинаються промені, що падають на лінзу паралельно головній оптичній осі. Фокусна відстань – відстань від оптичного центра лінзи до її фокуса. Фокальна площина – площина, яка проходить через фокус, перпендикулярна до головної оптичної осі і паралельна площині лінзи.

Для побудови зображення у лінзі потрібно використати будь-які два промені (рис. 67).

1. Промінь, який проходить через оптичний центр лінзи (не змінює напряму поширення).

2. Промінь, паралельний головній оптичній осі (після заломлення в лінзі йде через задній фокус).

3. Промінь, який проходить через передній фокус лінзи (після заломлення в лінзі йде паралельно головній оптичній осі).

Для розсіювальної лінзи передній фокус – уявний, і щоб його побудувати, беруть не самі промені, а їх продовження (рис. 68).

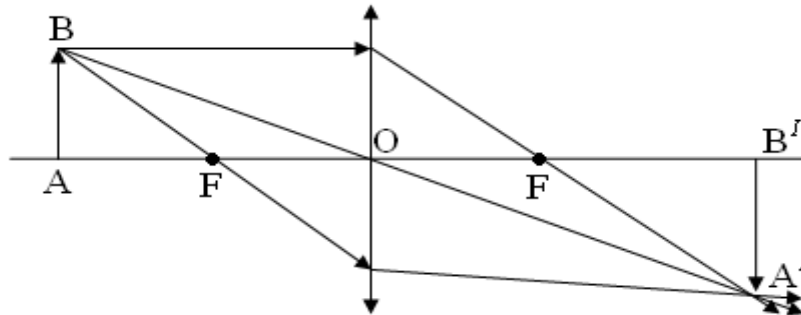


Рисунок 67

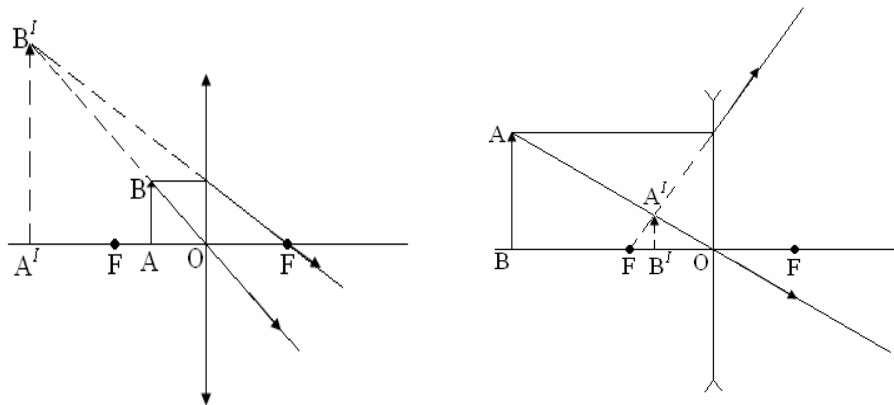


Рисунок 68

Формула тонкої збиральної лінзи:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} = D,$$

де d – відстань від предмета до лінзи,

f – відстань від лінзи до зображення,

F – фокусна відстань,

D – оптична сила лінзи.

Відстані до дійсних зображень треба брати зі знаком плюс, а до уявних – зі знаком мінус.

Відношення лінійного розміру зображення до відповідного лінійного розміру предмета називають лінійним збільшенням лінзи.

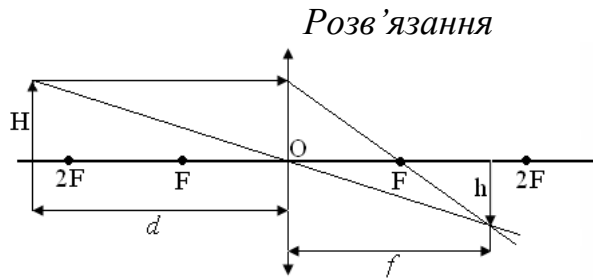
$$\beta = \frac{f}{d}.$$

Кутове збільшення: $\Gamma = \frac{1}{\beta}$.

Приклади розв'язування задач

1. На знімку, зробленому камерою з об'єктивом, фокусна відстань якого $13,5 \cdot 10^{-2}$ м при довжині камери $15 \cdot 10^{-2}$ м, вийшло зображення предмета заввишки $2 \cdot 10^{-2}$ м. Визначити дійсну величину предмета.

Дано
 $F=0,135$ м
 $f=0,15$ м
 $h=0,02$ м
 $H - ?$



Враховавши формулу збільшення лінзи та формулу тонкої лінзи, отримаємо дійсну величину предмета:

$$\frac{f}{d} = \frac{h}{H}; \quad \frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}; \quad H = \frac{hd}{f};$$

$$\frac{1}{d} = \frac{1}{F} - \frac{1}{f}; \quad \frac{1}{d} = \frac{f - F}{f \cdot F}; \quad d = \frac{f \cdot F}{f - F}.$$

Тоді

$$H = \frac{f \cdot F \cdot h}{f(f - F)} = \frac{F \cdot h}{f - F}.$$

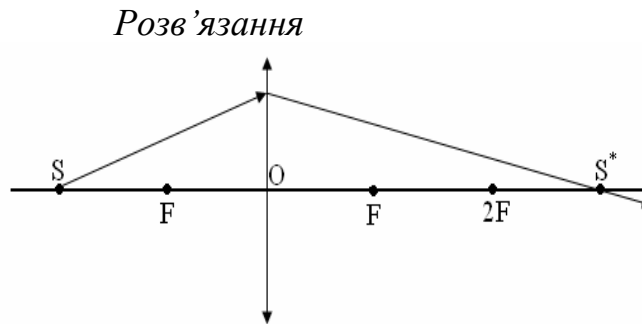
Підставивши числові значення, дістанемо:

$$H = \frac{0,135 \cdot 0,02}{0,15 - 0,135} = 0,18 \text{ м.}$$

Відповідь: дійсна величина предмета $H = 18$ см.

2. Фокусна відстань двоякоопуклої лінзи $F = 20$ см. Точка, що світиться, знаходиться на відстані 30 см від лінзи. Де буде зображення точки?

Дано
 $F=20$ см $= 0,2$ м
 $d=0,3$ м
 $f - ?$



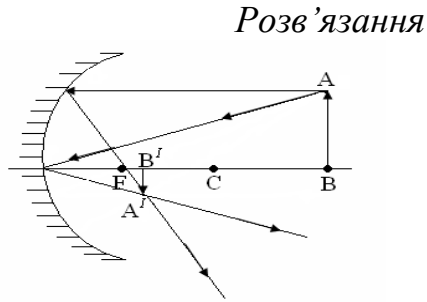
Запишемо формулу лінзи: $\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}; \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{F} - \frac{1}{d} = \frac{d - F}{F \cdot d},$

$$f = \frac{d \cdot F}{d - F} = \frac{0,3 \cdot 0,2}{0,3 - 0,2} = 0,6 \text{ м.}$$

Відповідь: $f = 0,6$ м.

3. Увігнуте сферичне дзеркало дає дійсне зображення, яке в два рази менше від предмета. Визначити фокусну відстань F дзеркала, якщо відстань між предметом і його зображенням $l = 0,75$ м.

Дано
 $\beta = \frac{f}{d} = 0,5$
 $l = 0,75 \text{ м}$
 $F - ?$



$$\beta = \frac{f}{d}; \quad f = \beta \cdot d;$$

За умовою задачі
 $l = d - f,$
 тобто $d - \beta d = l,$ отже

$$d = \frac{l}{1 - \beta} = \frac{0,75}{1 - 0,5} = 1,5 \text{ м},$$

$$f = d - l = 1,5 - 0,75 = 0,75 \text{ м},$$

$$F = \frac{df}{f + d} = \frac{1,5 \cdot 0,75}{0,75 + 1,5} = 0,5 \text{ м}.$$

Відповідь: $F = 0,5 \text{ м}.$

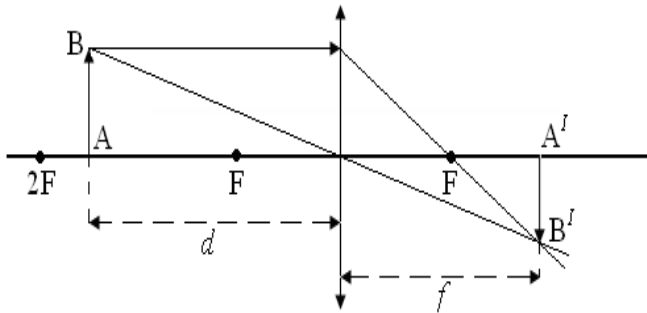
3. На якій відстані від предмета треба встановити екран, щоб двоопукла лінза з радіусом кривизни поверхонь $R = 0,2 \text{ м}$ і показником заломлення $n = 1,5$ давала дійсне зображення предмета, збільшене в два рази?

Дано
 $R_1 = R_2 = 0,2 \text{ м}$
 $\beta = 2$
 $n = 1,5$
 $l - ?$

Розв'язання

Зображення предмета дійсне і збільшене, отже предмет АВ встановлено між головним фокусом F і подвійною фокусною відстанню $2F$.

$$\beta = \frac{f}{d} \Rightarrow f = 2d.$$



Запишемо формулу тонкої лінзи:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{2d}; \quad d = \frac{3F}{2};$$

$$f + d = \frac{9F}{2}.$$

Фокусну відстань визначимо за формулою:

$$\frac{1}{F} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

$$\frac{1}{F} = (1,5 - 1) \left(\frac{1}{0,2} + \frac{1}{0,2} \right) = 5 \text{ м}^{-1},$$

$$F = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ м}.$$

Тоді $l = f + d = \frac{9 \cdot 0,2}{2} = 0,9 \text{ м}.$

Відповідь: $0,9 \text{ м}.$

Задачі для самостійного розв'язання

1. При розгляді предмета крізь збиральну лінзу було встановлено, що уявне зображення в 5 разів більше від самого предмета. Чому дорівнює оптична сила лінзи, якщо предмет лежить на відстані $4 \cdot 10^{-2}$ м від лінзи?

Відповідь: $D = 20 \text{ м}^{-1}$.

2. Свічка стоїть на відстані 12,5 см від збиральної лінзи, оптична сила якої становить 10 дптр. На якій відстані від лінзи вийде зображення і яке воно буде?

Відповідь: 50 см, збільшене в 4 рази.

3. Предмет розмістили на відстані $4 F$ від лінзи. У скільки разів його зображення на екрані менше від самого предмета?

Відповідь: 3 рази.

4. На якій відстані перед розсіювальною лінзою треба поставити предмет, щоб його уявне зображення було посередині між лінзою та її уявним фокусом?

Відповідь: у фокальній площині.

5. Розглядаючи предмет у збиральну лінзу й розміщуючи його на відстані 4 см від неї, дістають уявне зображення предмета, яке у 5 разів більше від нього. Яка оптична сила лінзи?

Відповідь: $D = 20$ дптр.

6. За допомогою збиральної лінзи потрібно дістати на екрані зображення предмета, збільшене в 20 разів. На якій відстані від лінзи потрібно поставити екран, коли головна фокусна відстань лінзи 0,4 м?

Відповідь: 8,4 м.

7. Фокусна відстань F вгнутого дзеркала 15 см. Дзеркало дає дійсне зображення предмета, зменшене в три рази. Визначити відстань від предмета до дзеркала.

Відповідь: 0,6 м.

8. Вгнуте сферичне дзеркало дає на екрані зображення предмета, збільшене в 4 рази. Відстань від предмета до дзеркала рівна 25 см. Визначити радіус кривизни дзеркала.

Відповідь: 40 см.

6.2 Фотометрія

Фотометрія – це розділ фізики, в якому вивчаються величини, що характеризують електромагнетне випромінювання та техніку його вимірювання.

Людське око може сприймати електромагнетні хвилі довжиною λ від 0,38 до 0,76 мкм і найчутливіше до зелених променів ($\lambda=0,556$ мкм).

Одиницею сили світла I є кандела (кд). Кандела – сила світла, яке випускається з поверхні площею $1/600000 \text{ м}^2$ повного випромінювача в перпендикулярному напрямі при температурі випромінювача, що дорівнює температурі твердіння платини при тиску 101325 Па.

Світловий потік Φ – це кількість теплової енергії, що проходить через деяку поверхню за одиницю часу.

$$\Phi = \alpha \frac{W}{\tau},$$

де $\alpha \leq 1$ – функція видимості людського ока, яка дорівнює нулю, коли довжина хвиль $\lambda < 0,38$ мкм і $\lambda > 0,76$ мкм, і дорівнює одиниці при $\lambda = 0,550$ мкм.

Одиниця світлового потоку в СІ – люмен, $1 \text{ лм} = 1 \text{ кд} \cdot 1 \text{ ср}$.

Світловий потік дорівнює добутку сили світла джерела на тілесний кут ω , в який посилають випромінювання :

$$\Phi = I \cdot \omega.$$

Якщо джерело випромінює світло рівномірно у всіх напрямках, то сила світла:

$$I = \frac{\Phi}{4\pi}.$$

Відношення світлового потоку Φ , що падає на поверхню площею S , до цієї площі називають освітленістю E :

$$E = \frac{\Phi}{S}.$$

За одиницю освітленості в СІ приймають люкс (лк). Освітленість поверхні точковим джерелом прямо пропорційна силі світла джерела, косинусу кута падіння променів і обернено пропорційна квадрату відстані від джерела до поверхні:

$$E = \frac{I}{R^2} \cos \alpha.$$

Приклади розв'язування задач

1. На стовпі заввишки 6 м висить лампа 400 кд. Обчислити освітленість на відстані 8 м від основи стовпа.

Дано
$I=400 \text{ кд}$
$h=6 \text{ м}$
$l=8 \text{ м}$
$E - ?$

Розв'язання
Із закону освітленості визначимо E :

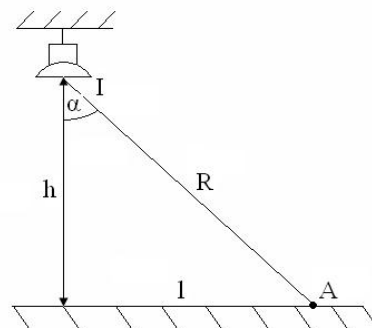
$$E = \frac{I}{R^2} \cos \alpha,$$

$$R = \sqrt{h^2 + l^2},$$

$$\cos \alpha = \frac{h}{R}.$$

$$E = \frac{I \cdot h}{(h^2 + l^2) \cdot R} = \frac{400 \cdot 6}{(36 + 64) \cdot 10} = 2,4 \text{ лк}.$$

Відповідь: $E = 2,4$ лк.



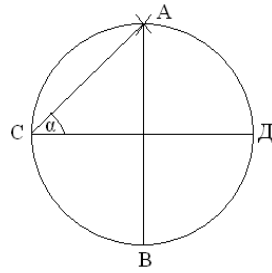
2. Тунель циліндричної форми радіусом R освітлюється світильником, встановленим у верхній точці склепіння. Порівняти освітленості

найнижчої точки тунелю точно під світильником і точки, що лежить на горизонтальному діаметрі перерізу тунелю.

Розв'язання

Дано
 $h_1 = 2R$
 $h_2 = R$

$\frac{E_1}{E_2} = ?$



В найнижчій точці $E_1 = \frac{I}{4R^2}$.

В точці С

$$E_2 = \frac{I \cdot \cos \alpha}{AC^2}, \quad AC = R\sqrt{2},$$

$\alpha = 45^\circ$. Тоді $E_2 = \frac{I\sqrt{2}}{4R^2}$.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

Відповідь: освітленість в точці В у $\sqrt{2}$ разів менша.

3. Дві лампи по 50 кд кожна висять на висоті 1 м над поверхнею стола.

Відстань між лампами 1,4 м. Знайти освітленість стола над кожною лампою.

Дано
 $I = 50 \text{ кд}$
 $h = 1 \text{ м}$
 $l = 1,4 \text{ м}$
 $E_1 = ? \quad E_2 = ?$

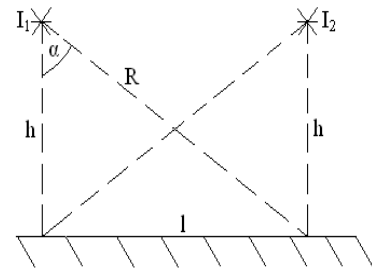
Розв'язання

Освітленість над кожною лампою дорівнює сумі освітленостей кожної лампи:

$$E = E_1 + E_2 = \frac{I}{h^2} + \frac{I}{R^2} \cos \alpha,$$

$$R = \sqrt{h^2 + l^2} = \sqrt{1^2 + 1,4^2} = 1,72 \text{ м},$$

$$\cos \alpha = \frac{h}{R} = \frac{1}{1,72} = 0,6; \quad E = \frac{50}{1} + \frac{50 \cdot 0,6}{2,96} = 60 \text{ лк}.$$



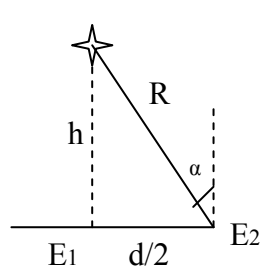
Відповідь: 60 лк.

4. Світильник з молочного скла має форму кулі. Його підвішено на висоті $h = 1 \text{ м}$ над центом круглого стола діаметром 2 м. Сила світла кулі 50 кд.

Визначити світловий потік лампи, освітленість у центрі і на краю стола.

Розв'язання

Дано
 $I = 50 \text{ кд}$
 $d = 2 \text{ м}$
 $h = 1 \text{ м}$
 $\Phi = ? \quad E_1 = ? \quad E_2 = ?$



Світловий потік Φ , який випромінює джерело світла I , буде визначатися:

$$\Phi = 4\pi I = 4 \cdot 4,13 \cdot 50 = 628 \text{ лм}.$$

Освітленість у центрі стола:

$$E_1 = \frac{I}{h^2} = \frac{50}{1} = 50 \text{ лк}.$$

Освітленість на краю стола:

$$E_2 = \frac{I}{R^2} \cos \alpha = \frac{I \cdot h}{\left[h^2 + \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}},$$

$$E_2 = \frac{50 \cdot 1}{\left[1 + \frac{4}{4}\right]^{\frac{3}{2}}} = 17,7 \text{ лк.}$$

Відповідь: 628 лм, 50 лк, 17,7 лк.

Задачі для самостійного розв'язання

1. Ліхтар, сила світла якого 500 кд, висить на стовпі на висоті 3 м від поверхні землі і дає освітленість вулиці. Визначити освітленість поверхні землі на відстані 4 м від основи стовпа.

Відповідь: 12 лк.

2. Світловий потік, який становить 0,02 лм, падає перпендикулярно на поверхню площею 5 см². Яка її освітленість?

Відповідь: 40 лк.

3. На книгу, освітлену променями сонця, перпендикулярно до її поверхні падає світловий потік 40 лм. Як зміниться світловий потік, якщо книгу відхилити на 30°?

Відповідь: 34 лм.

4. Лампа в 200 кд розміщена на відстані 1 м від робочого місця кресляра. Освітленість поверхні креслення 100 лк. Під яким кутом падають промені світла на креслення?

Відповідь: 60°.

5. Для освітлення вулиць застосовують люмінесцентні лампи, кожна з яких має силу світла 157 кд. Підвішують лампи зазвичай на висоті 8 м від землі. Відстань між сусідніми арматурами з лампами 30 м. У кожній арматурі закріплено по 2 лампи. Визначити освітленість тротуару посередині між точками, в яких підвішені лампи.

Відповідь: 0,51 лк.

6. На відстані 1 м одне від одного розміщені два точкових джерела світла 16 і 64 кд. Знайти таку точку між ними, яка була б однаково освітлена.

Відповідь: 0,33 м від першого джерела.

6.3 Фізична оптика

Хвильові властивості світла та його взаємодію з речовиною вивчають у спеціальному розділі – фізичній оптиці. Світло поширюється з скінченною швидкістю. Досліди свідчать, що швидкість світла в різних середовищах дорівнює:

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

де c – швидкість світла у вакуумі,

n – абсолютний показник заломлення.

Дисперсія світла – явище залежності швидкості світла, а також і показника заломлення від довжини хвилі (кольору) або від частоти.

Біле світло – це сукупність електромагнетних хвиль з різною довжиною хвилі. Біле світло при проходженні через призму розкладається в спектр. Найменше заломлюються червоні промені, найбільше – фіолетові. Найбільша швидкість у променів червоного кольору, найменша – у променів фіолетового кольору.

Інтерференція світла. Інтерференцією називають явище, яке виникає в процесі накладання двох (або більше) світлових хвиль однакового періоду в однорідному ізотропному середовищі, внаслідок чого енергія хвиль у просторі перерозподіляється. Інтерферувати можуть тільки когерентні хвилі, тобто хвилі рівних частот і сталої у часі різниці фаз. Когерентні промені дістають поділом пучка світла від одного і того ж самого джерела на два промені або використовуючи лазери.

Результуюче коливання максимально підсилюється тоді, коли різниця ходу додаваних хвиль дорівнює парному числу півхвиль або цілому числу довжин хвиль.

$$\Delta l = \pm n\lambda - \text{max}$$

Результуюче коливання ослаблюється, якщо різниця ходу додаваних хвиль дорівнює непарному числу півхвиль

$$\Delta l = \pm(2n + 1)\frac{\lambda}{2} - \text{min},$$

де Δl – різниця ходу двох хвиль, які збуджують коливання в даній точці,

λ – довжина хвилі,

$n = 0, 1, 2, 3 \dots$ - називають порядком інтерференційного максимуму або мінімуму.

Приклади спостереження інтерференції хвиль.

1. Виникнення кольорів тонких плівок.

2. Виникнення кілець Ньютона (смуги однакової довжини).

Інтерференція використовується для

а) перевірки якості обробки поверхонь;

Нерівність обробленої поверхні до 10^{-6} см зумовлює викривлення інтерференційних смуг.

б) просвітлення оптики.

Усунення відбиття світла від поверхонь оптичних приладів завдяки нанесенню на їх поверхню плівки з показником заломлення меншим за показник заломлення матеріалу, з якого виготовлена оптична система.

в) інтерферометри – прилади, призначені для точного вимірювання довжини світлових хвиль, визначення показника заломлення газів;

г) голографія – метод створення зображень, оснований на збереженні інтерференційної картини, що створюється при освітленні об'єкта.

Дифракція світла - явище огинання перешкод світловими хвилями, які поширюються в неоднорідному середовищі. Дифракція спостерігається під час проходження світла через малі отвори чи огинання світлом перешкод, розміри яких малі (співмірні) порівняно з довжиною хвилі.

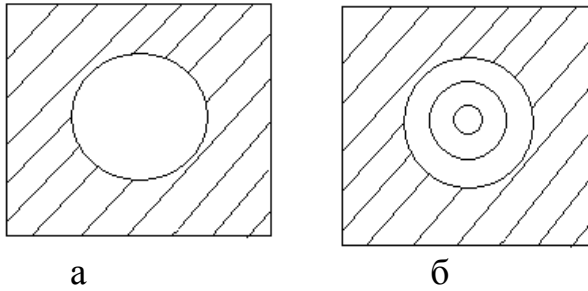


Рисунок 69

а – дифракційна картина, коли діаметр отвору порівняний з відстанню до екрана (рис. 69);

б – коли діаметр отвору в тисячі разів менший за відстань до екрана (рис. 69).

Оптичний прилад з великою кількістю вузьких прозорих щілин (розділених непрозорими проміжками), на яких спостерігається явище дифракції, називають дифракційною решіткою (рис. 70). Вона використовується для дослідження спектрального складу світла і визначення довжини хвилі.

Формула дифракційної решітки (умова, за якої хвилі, що йдуть від щілини, підсилюють одна одну):

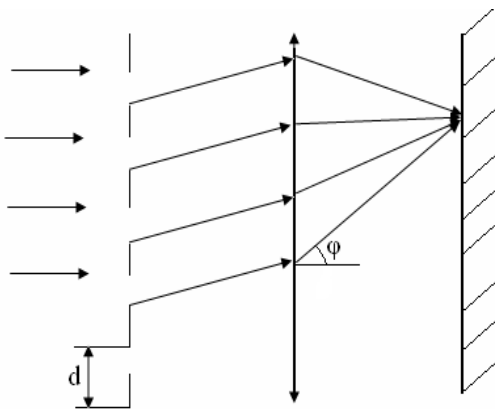


Рисунок 70

щілини, підсилюють одна одну):

$$d \cdot \sin \varphi = k \cdot \lambda - \text{max}$$

$$d \cdot \sin \varphi = (2k+1)\lambda/2 - \text{min}$$

k – порядок максимуму;

λ – довжина хвилі;

$d = a + b$ – період дифракційної решітки;

a – ширина прозорих щілин;

b – непрозорих щілин.

6.3.1 Поляризація світла

Явища інтерференції і дифракції світла підтверджують його хвильову природу. З хвильової точки зору пояснюють і явище поляризації, яке можна спостерігати тільки в поперечних хвилях. Світлову хвилю називають плоскополяризованою, якщо вектори напруженості електричного поля \vec{E} і магнітного поля \vec{B} в цій електромагнітній хвилі коливаються в певній площині. У природному світлі вектори \vec{E} і \vec{B} коливаються в довільних площинах, перпендикулярних до напрямку поширення хвилі.

Поляризатором називається пристрій, який перетворює природне світло в поляризоване. Поляризатори мають властивість пропускати світлові хвилі з коливаннями вектора \vec{E} , який лежить тільки в одній площині (рис. 71).

Явище дифракції хвиль тісно пов'язане з інтерференцією хвиль. Дифракційна картина, по суті, є нічим іншим, як інтерференційною картиною хвиль, на шляху яких є перешкода. Чим менший розмір перешкоди, тим більша дифракція.

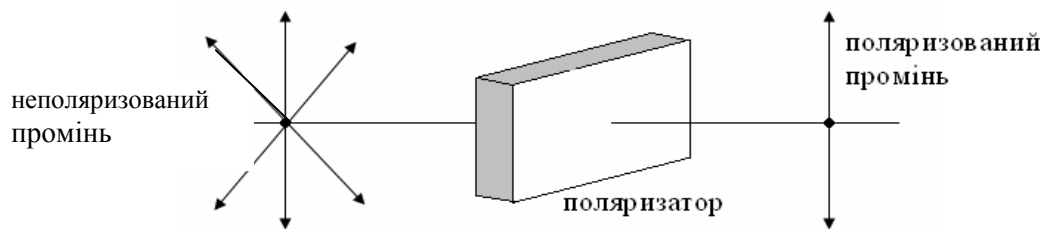


Рисунок 71

Приклади розв'язування задач

1. Чи можуть промені світла різних кольорів мати однакові довжини хвиль?

Дано

$$\lambda_{\text{зел}} = 570 \text{ нм}$$

$$\lambda_{\text{чер}} = 760 \text{ нм}$$

$n - ?$

Розв'язання

В різних середовищах світло одного й того ж самого кольору має різну довжину хвилі. Колір світла визначається тільки частотою. Тому потрібно в даній задачі визначити показник заломлення середовища, в якому довжина хвилі червоного світла дорівнювала б довжині хвилі зеленого в повітрі.

$$\lambda_{\text{чер}} = n \cdot \lambda_{\text{зел}}, \quad n = \frac{\lambda_{\text{чер}}}{\lambda_{\text{зел}}} = \frac{760}{570} = 1,33.$$

Відповідь: можуть. Зелене світло поширюється в середовищі з показником заломлення 1,33 з довжиною хвилі $\lambda_{\text{чер}}$.

2. Визначити довжину світлової хвилі за допомогою дифракційної решітки, якщо стала решітки 0,01 мм. Перше дифракційне зображення дістали на відстані 11,8 см від центрального зображення і на відстані 2 м від решітки.

Дано

$$l = 2 \text{ м}$$

$$h = 11,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$d = 0,01 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$\lambda - ?$

Розв'язання

З формули для максимуму для дифракційної решітки визначимо синус кута φ :

$$d \cdot \sin \varphi = k \cdot \lambda, \quad k = 1,$$

$$\sin \varphi = \frac{\lambda}{d}, \quad \sin \varphi = \frac{h}{l}.$$

Отже,

$$\frac{\lambda}{d} = \frac{h}{l} \Rightarrow \lambda = d \frac{h}{l}.$$

Підставивши числові значення, дістанемо:

$$\lambda = \frac{0,01 \cdot 10^{-3} \cdot 11,8 \cdot 10^{-2}}{2} = 5,9 \cdot 10^{-9} \text{ м}.$$

Відповідь: 5,9 нм.

3. Два когерентних джерела S_1 і S_2 (див. рис.) випускають монохроматичне світло з довжиною хвилі 600 нм. Визначити, на якій відстані від точки О буде перший максимум освітленості, якщо $|OC| = 4$ м; $|S_1S_2| = 1$ мм.

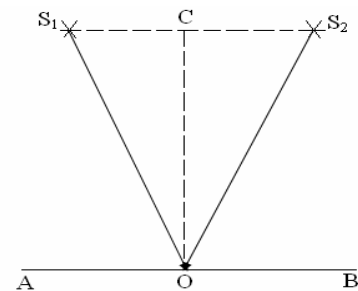
Розв'язання

Дано
 $\lambda = 600 \cdot 10^{-9}$ м
 $|S_1S_2| = 1 \cdot 10^{-3}$ м
 $|OC| = 4$ м
 Δ - ?

Знайдемо шляхи, що проходять промені до точки О:

$$S_1O = \sqrt{S_1C^2 + CO^2},$$

$$S_2O = \sqrt{S_2C^2 + CO^2}.$$



Враховавши, що

$$S_1C = S_2C, \quad S_1O = S_2O, \quad \text{отже } \Delta = 0.$$

Джерела будуть когерентні і різниця ходу в точці О рівна нулю, отже в точці О – інтерференційний максимум.

Відповідь: максимум буде в точці О.

4. На дифракційну решітку, період якої дорівнює 0,01 мм, падає монохроматичне світло. Перший дифракційний максимум зміщений на екрані на 3 см від початкового напрямку поширення. Яка довжина хвилі світла, якщо відстань від решітки до екрана становить 0,7 м?

Розв'язання

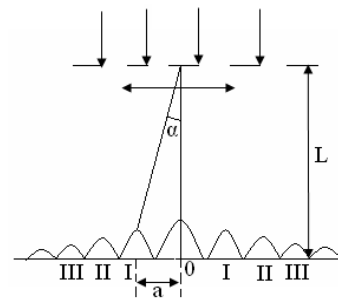
Дано
 $d = 10^{-5}$ м
 $a = 0,03$ м
 $L = 0,7$ м
 $k = 1$
 λ - ?

З рівняння, що описує умову утворення дифракційного максимуму, отримаємо:

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

$$k = 1,$$

$$d \cdot \sin \varphi = \lambda$$



$$\sin \varphi \approx \tan \varphi = \frac{a}{L} \quad (\text{для малих кутів}),$$

$$\lambda = \frac{d \cdot a}{L} = \frac{10^{-5} \cdot 0,03}{0,7} \approx 0,043 \cdot 10^{-5} =$$

Відповідь: 430 нм.

$$= 430 \text{ нм.}$$

5. На мильну плівку в повітрі під кутом $61^\circ 10'$ падає паралельний пучок монохроматичних променів $\lambda = 0,52$ мкм. При якій найменшій товщині плівки буде видно інтерференційні смуги, якщо спостереження ведуть у відбитому світлі?

Дано
 $\lambda = 0,52 \cdot 10^{-6}$ м
 $i = 61^\circ 10'$
 $n = 1,33$
 d - ?

Розв'язання

Запишемо умову максимуму:

$$2k(\lambda/2) = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \lambda/2,$$

де d – товщина плівки в точці спостереження,
 n – показник заломлення плівки,

i – кут падіння променів світла,

λ – довжина хвилі падаючого світла.

Доданок $\lambda/2$ враховує втрату півхвилі при відбитті світла від мильної плівки (тобто від межі поділу повітря - плівка).

Припустивши, що $k = 1$, знайдемо (товщина мінімальна):

$$d = \frac{\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 i}};$$
$$d = \frac{0,52 \cdot 10^{-6}}{4\sqrt{1,33^2 - 0,876^2}} = 0,13 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 0,13 \text{ мкм.}$$

Відповідь: 0,13 мкм.

Задачі для самостійного розв'язання

1. З якою швидкістю поширюється світло у воді, коли при частоті 600 ТГц довжина хвилі дорівнює 0,51 мкм?

Відповідь: 220 Мм/с.

2. Воду освітлено червоним світлом, для якого довжина хвилі в повітрі становить 0,7 мкм. Яку довжину матиме хвиля у воді? Який колір побачить людина, розплющивши очі під водою?

Відповідь: 0,53 мкм, червоний колір.

3. Визначити товщину мильної плівки, якщо у відбитому світлі вона здається зеленою. Довжина хвилі $5 \cdot 10^{-7}$ м. Кут між перпендикуляром і променем зору 35° . Показник заломлення плівки 1,33.

Відповідь: $0,1 \cdot 10^{-6}$ м.

4. Два когерентні промені білого світла приходять в одну і ту саму точку екрана з різницею ходу $3 \cdot 10^{-6}$ м. Які промені видимого світла в цій точці максимально підсилюються, а які максимально послаблюються?

Відповідь: підсилюються λ : $0,75 \cdot 10^{-6}$ м, $0,6 \cdot 10^{-6}$ м, $0,5 \cdot 10^{-6}$ м, послаблюються λ : $0,667 \cdot 10^{-6}$ м, $0,545 \cdot 10^{-6}$ м, $0,461 \cdot 10^{-6}$ м.

5. Дифракційна решітка має 120 штрихів на 1 мм. Визначити довжину хвилі монохроматичного світла, що падає на решітку, якщо кут між двома спектрами першого порядку становить 8° .

Відповідь: 580 нм.

6. Визначити кут відхилення променів зеленого світла ($\lambda = 0,55$ мкм) у спектрі першого порядку, утвореному за допомогою дифракційної решітки, період якої 0,02 мм.

Відповідь: $1,5^\circ$.

7. Яку ширину має весь спектр першого порядку (довжини хвиль лежать у межах від 0,38 до 0,76 мкм), утворений на екрані, віддаленому на 3 м від дифракційної решітки з періодом 0,007 мм?

Відповідь: 11 см.

8. Знайти найбільший порядок спектра для жовтої лінії натрію з довжиною хвилі 5890 \AA , якщо період дифракційної решітки рівний 2 мкм.

Відповідь: $k = 3$.

7 КВАНТОВО-ОПТИЧНІ ЯВИЩА

У 1900 році німецький фізик М. Планк висунув гіпотезу про те, що енергія випромінюється тілом не безперервно, як це припускалось у класичній фізиці, а окремими дискретними порціями – квантами (від латинського слова «квантум», що означає кількість). Світло розглядають як потік частинок – фотонів, маса спокою яких дорівнює нулю ($m_0 = 0$). Енергія фотонів пропорційна частоті коливань:

$$E = h\nu,$$

де $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка або квант дії.

Виходячи із закону пропорційності маси і енергії і гіпотези Планка, отримаємо:

$$E = mc^2; E = h\nu.$$

Прирівнявши праві частини цих рівнянь, отримаємо вираз для маси:

$$m_\phi = \frac{h\nu}{c^2} \text{ з урахуванням } c = \nu \cdot \lambda.$$

$$m_\phi = \frac{h}{\lambda \cdot c}.$$

Імпульс фотона має напрям коливання світла і дорівнює:

$$p = m\nu = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Корпускулярні властивості світла виявляються тим виразніше, чим більша частота світлових коливань. У монохроматичному світлі з частотою ν всі фотони мають однакову енергію, імпульс і масу.

7.1 Фотоефект

Фотоефект – явище взаємодії електромагнетного випромінювання з речовиною, в результаті якого енергія фотонів передається електронам речовини й останні переходять у новий енергетичний стан.

Розрізняють:

1) зовнішній фотоефект – виривання електронів з речовини під дією світла;

2) внутрішній фотоефект – перерозподіл електронів за енергетичними рівнями під дією світла (електромагнітного випро-мінювання);

Внутрішній фотоефект властивий деяким напівпровідникам і меншою мірою діелектрикам.

3) ядерний фотоефект – це явище виривання нуклонів із ядра під дією жорсткого рентгенівського або γ -випромінювання.

Явище зовнішнього фотоефекту вперше дослідив О. Г. Столетов у 1890р. Схему дослідів Столетова для дослідження зовнішнього фотоефекту зображено на рисунку (рис.72).

Залежність сили фотоструму від анодної напруги при сталому світовому потоці має такий вигляд (рис. 73).

I_H - струм насичення, який визначається числом електронів, що вириваються світлом з поверхні катода за одиницю часу.

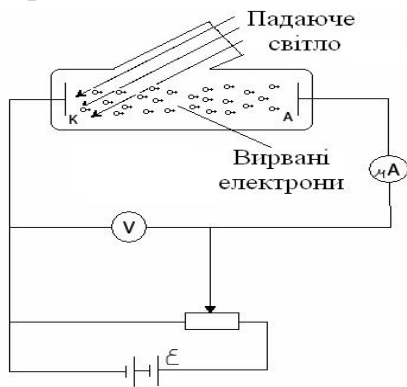


Рисунок 72

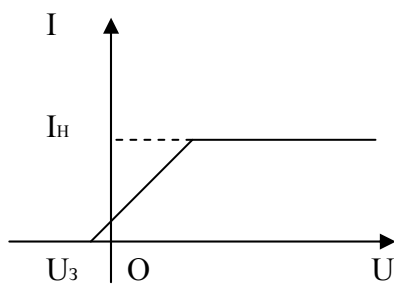


Рисунок 73

Досліди Столетова показують, що:

1. Сила фотоструму насичення I_H (кількість електронів, вирваних з поверхні металу за 1с), який виникає при освітленні монохроматичним світлом, пропорційна світловому потоку, що падає на катод.

2. Швидкість фотоелектронів визначається частотою падаючого світла ν і не залежить від інтенсивності світлового потоку.

3. Для будь-якої речовини характерна мінімальна частота ν_{min} , нижче якої фотоелектричний ефект не спостерігається. Дану частоту світла називають червоною межею фотоелектричного ефекту.

4. Явище фотоелектричного ефекту безінерційне.

Проміжок часу між початком освітлення і початком фотоструму не перевищує 10^{-9} с.

А. Ейнштейн в 1905 році показав, що явище фотоелектричного ефекту і його закономірності можуть бути пояснені на основі запропонованої ним квантової теорії фотоелектричного ефекту. За законом збереження енергії:

$$h\nu = A + \frac{m v^2}{2}.$$

Це рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоелектричного ефекту (виражає закон збереження енергії).

Енергія падаючого фотона витрачається на виконання електронем роботи виходу A з металу і надання електрону, який вилетів, кінетичної енергії $\frac{m v^2}{2}$.

Енергія кванта має бути більшою, ніж робота виходу A .

$$h\nu \geq A.$$

Мінімальна частота ν_{min} (червона межа), з якої для даної речовини починається фотоелектричний ефект, дорівнює:

$$\nu_{min} = \frac{A}{h}.$$

7.2 Ефект Комптона

Корпускулярні властивості світла особливо чітко проявляються в явищі розсіювання рентгенівських променів. У 1923 році А. Комптон, досліджуючи розсіювання монохроматичних рентгенівських променів

речовинами з легкими атомами (парафін, бор), виявив, що у складі розсіяного випромінювання поряд з випромінюванням початкової довжини хвилі λ спостерігається також випромінювання більшої довжини хвилі λ' . Довжина хвилі λ' розсіяного випромінювання більша за довжину хвилі λ падаючого випромінювання, причому різниця $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ не залежить від довжини хвилі λ падаючого випромінювання і природи розсіювальної речовини, а визначається лише величиною кута розсіювання.

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta),$$

де m_0 - маса спокою електрона.

$$\lambda_c = \frac{h}{m_0 c} = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м} - \text{комптонівська довжина хвилі.}$$

7.3 Тиск світла

Одним з підтверджень наявності у фотонів маси та імпульсу є світловий тиск. У 1901 році П. М. Лебедев вперше експериментально виявив і виміряв тиск світла на тверді тіла і гази. Прилад Лебедева – це досить чутливі крутильні терези, рухома система яких складається з легкого каркаса із закріпленими на ньому тонкими кружками, які розміщені симетрично відносно осі підвісу. Деякі крильця були дзеркальними, а поверхня інших була затемнена. Згідно з теорією світла Максвелла тиск чинить електромагнетна хвиля, що падає на поверхню:

$$p = \frac{E_e}{c},$$

$$\text{де } E_e = \frac{\Phi_e}{S},$$

E_e - енергетична освітленість поверхні,

c - швидкість світла у вакуумі.

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

ρ - коефіцієнт відбиття.

Приклади розв'язування задач

1. Скільки фотонів випромінюється за 1 с лампою розжарювання, корисна потужність якої становить 60 Вт, якщо середня довжина електромагнетних хвиль 662 нм?

Дано

$$t = 1 \text{ с}, P = 60 \text{ Вт}$$

$$\lambda = 6,62 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$$

n - ?

Розв'язання

$$\text{Енергія одного кванта: } E_0 = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}, \text{ енергія,}$$

$$\text{що випромінюється за час } t: E = Pt = nE_0 = n \cdot \frac{hc}{\lambda}.$$

Кількість фотонів, що переносять таку енергію:

$$Pt = n \cdot \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow n = \frac{Pt\lambda}{hc}$$

Розрахувавши, отримаємо: $n = \frac{60 \cdot 1 \cdot 6,62 \cdot 10^{-7}}{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} = 2 \cdot 10^{20}$.

Відповідь: $n = 2 \cdot 10^{20}$.

2. Червона межа фотоефекту для цезію дорівнює 653 нм. Яку мінімальну напругу треба прикласти між катодом і анодом фотоелемента для припинення струму, якщо катод опромінюється світлом з довжиною хвилі 500 нм?

Дано

$$\lambda_0 = 653 \cdot 10^{-9} \text{ м}$$

$$\lambda = 500 \cdot 10^{-9} \text{ м}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$U - ?$

Розв'язання

Рівняння Ейнштейна для фотоефекту:

$$\frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{h \cdot c}{\lambda_0} + \frac{m \cdot g^2}{2}$$

$$\text{Звідси: } E_k = \frac{m \cdot g^2}{2} = h \cdot c \cdot \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right)$$

Враховувавши закон збереження енергії $E_k = eU$,

отримаємо: $eU = hc \cdot \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right)$, $U = \frac{hc}{e} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right)$. Розрахувавши:

$$U = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^{-19}} \left(\frac{1}{5 \cdot 10^{-7}} - \frac{1}{6,57 \cdot 10^{-7}} \right) = 0,58 \text{ В.}$$

Відповідь: $U = 0,58 \text{ В}$.

3. Тиск монохроматичного світла з довжиною хвилі $\lambda = 0,66 \text{ мкм}$ на чорну поверхню дорівнює 10^{-7} Н/м^2 . Скільки фотонів падає щосекунди на 1 м^2 поверхні?

Дано

$$\lambda = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$p = 10^{-7} \text{ Н/м}^2$$

$$\rho = 0, S = 1 \text{ м}^2$$

$n - ?$

Розв'язання

Тиск світла визначається за формулою:

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

де $E_e = \frac{\Phi_e}{S}$ – енергетична освітленість поверхні.

Потік випромінювання: $\Phi_e = nh\nu$.

$$\text{Отже, } p = \frac{nh\nu}{cS} = \frac{nhc}{\lambda cS} = \frac{nh}{\lambda S}$$

$$\text{Звідси: } n = \frac{p\lambda S}{h} = \frac{10^{-7} \cdot 0,6 \cdot 10^{-6} \cdot 1}{6,62 \cdot 10^{-34}} = 9,05 \cdot 10^{19} \text{ с}^{-1}$$

Відповідь: $n = 9,05 \cdot 10^{19} \text{ с}^{-1}$.

4. Фотон з енергією $E = 0,75 \text{ МеВ}$ розсіявся на вільному електроні під кутом $\theta = 60^\circ$. Вважаючи, що кінетична енергія і імпульс електрона до удару з фотоном були досить малими, визначити: 1) енергію E' - розсіяного фотона; 2) кінетичну енергію E_k електрона віддачі.

Дано

$$E = 0,75 \cdot 10^6 \text{ eV}$$

$$\theta = 60^\circ$$

$$E' - ?, E_K - ?$$

Розв'язання

Використаємо формулу Комптона:

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

Виражаємо довжини хвиль λ' і λ через енергії E' і E_K відповідних фотонів, отримаємо: $\frac{h \cdot c}{E_1} - \frac{h \cdot c}{E} = \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta)$.

Розділимо обидві частини даного рівняння на hc , отримаємо:

$$\frac{1}{E_1} - \frac{1}{E} = \frac{1 - \cos \theta}{mc^2} .$$

Врахувавши $E_0 = mc^2$ - енергію спокою електрона:

$$E' = \frac{E}{\frac{E}{E_0}(1 - \cos \theta) + 1} = \frac{0,75 \cdot 10^6}{\frac{0,75 \cdot 10^6}{0,51 \cdot 10^6}(1 - \cos 60^\circ) + 1} = 0,43 \cdot 10^6 \text{ eV} .$$

Кінетична енергія електрона віддачі визначається із закону збереження енергії: $E_K = E - E' = 0,75 \cdot 10^6 - 0,43 \cdot 10^6 = 0,32 \cdot 10^6 \text{ eV}$.

Відповідь: $E' = 0,43 \text{ MeV}$, $E_K = 0,32 \text{ MeV}$.

Задачі для самостійного розв'язання

1. Визначити довжину хвилі променів, кванти яких мають таку саму енергію, що й електрон, який пролетів різницю потенціалів 4,1 В.

Відповідь: $\lambda = 0,3 \text{ мкм}$.

2. Джерело світла, потужність якого 100 Вт, випускає $5 \cdot 10^{20}$ фотонів за 1 с. Обчислити середню довжину хвилі випромінювання.

Відповідь: $\lambda = 0,99 \text{ мкм}$.

3. Якої довжини промені світла треба спрямувати на поверхню цезію, щоб максимальна швидкість фотоелектронів становила 2000 км/с? Червона межа фотоефекту для цезію дорівнює 690 нм.

Відповідь: $\lambda = 94 \text{ нм}$.

4. Визначити максимальну швидкість \mathcal{V}_{\max} фотоелектронів, які вириваються з поверхні срібла під дією ультрафіолетового випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 0,155 \text{ мкм}$.

Відповідь: $\mathcal{V}_{\max} = 1,08 \text{ Мм/с}$.

5. В результаті ефекту Комптона фотон при співударі з електроном був розсіяний на кут $\theta = 90^\circ$. Енергія E' - розсіяного фотона рівна 0,4 МеВ. Визначити енергію E падаючого фотона.

Відповідь:

6. Фотон з енергією $E = 0,4 \text{ МеВ}$ розсіявся під кутом $\theta = 90^\circ$ на вільному електроні. Визначити енергію E' - розсіяного фотона і кінетичну енергію E_K електрона віддачі.

Відповідь: $E' = 0,224 \text{ МеВ}$, $E_K = 0,176 \text{ МеВ}$.

7. Визначити світловий тиск сонячного випромінювання на 1 м^2 земної поверхні перпендикулярно до напрямку випромінювання. Сонячна стала $E_E = 1,39 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$, коефіцієнт відбиття θ .

Відповідь: $p = 46,3 \cdot 10^7 \text{ Н/м}$.

8. Визначити енергію, масу і кількість руху фотона, якому відповідає довжина хвилі $0,1 \text{ нм}$.

Відповідь: $E = 19,86 \cdot 10^{-16} \text{ Дж}$; $m = 2,2 \cdot 10^{-34} \text{ кг}$; $p = 6,62 \cdot 10^{-24} \text{ кг}\cdot\text{м/с}$.

8 ФІЗИКА АТОМА І АТОМНОГО ЯДРА

8.1 Фізика атома

Першу модель атома було запропоновано у 1902 р. У. Кельвіном (У. Томсоном): позитивно заряджена куля, всередині якої знаходяться нерухомі електрони. Дана модель не пояснювала стійкості атома та спектральні закономірності випромінювання атомів. Досліджуючи проходження α – частинок з енергією в декілька МеВ крізь тонкі пластини, зробили висновок про те, що атом складається з позитивно зарядженого ядра і електронів, які його оточують. Розмір ядра $\approx 10^{-14} - 10^{-15} \text{ м}$, розміри атома $\approx 10^{-10} \text{ м}$ (планетарна модель). Модель атома подібна до сонячної системи, тому її називають планетарною.

За законами класичної електродинаміки електрони рухаються по замкнених орбітах навколо позитивного ядра. Цей рух буде прискорений (доцентрове прискорення), тому електрони випромінюють електромагнетні хвилі. Енергія електрона при цьому зменшується і він повинен впасти на ядро. Однак атоми стійкі і випромінюють несуцільний спектр, а лінійчатий. Отже, планетарна модель Резерфорда також мала багато протиріч. В 1913 р. Н. Бор розробив теорію атома водню, яка була підтверджена експериментально. В основі борівської теорії атома лежать два основні постулати:

1) електрони можуть рухатись в атомі тільки по певних орбітах, перебуваючи на яких, вони, незважаючи на наявність у них прискорення, не випромінюють (постулат стаціонарних атомів);

2) правило квантування орбіти: в стаціонарному стані атома електрони, рухаючись по колових орбітах, повинні мати дискретні, квантові значення моменту імпульсу, що відповідає умові:

$$m \vartheta_n r_n = n \frac{h}{2\pi},$$

де m – маса електрона,

ϑ – швидкість електрона на n -й орбіті,

r – її радіус,

h – стала Планка.

3) правило частот: атом випромінює або поглинає квант електромагнетної енергії при переході електрона з одного стаціонарного стану в інший.

Енергія кванта дорівнює різниці енергії стаціонарних станів електрона до E_2 і після E_1 переходу:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu.$$

Розглянемо найпростіший атом – атом водню. Він складається з ядра, до складу якого входить протон і електрон, що обертаються навколо ядра по коловій орбіті. За борівською моделлю ядро атома нерухоме, тому повна енергія E атома на n -й орбіті є сумою кінетичної енергії E_k і енергії взаємодії електрона з ядром.

$$E = E_k + E_n = \frac{m g_n^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}.$$

На електрон з боку ядра діє кулонівська сила притягання, надаючи йому доцентрове прискорення. Тому

$$\frac{m g_n^2}{r_n} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2}.$$

З цих двох рівнянь дістанемо:

$$g_n = \frac{e^2}{2\epsilon_0 h n}, \quad r_n = \frac{\epsilon_0 h^2 n^2}{\pi m e^2}.$$

Тоді повна енергія електрона:

$$E_n = -\frac{m e^2}{8\epsilon_0 h^2} \cdot \frac{1}{n^2}.$$

При переході електрона з одного енергетичного рівня на інший виділяється або поглинається квант енергії:

$$h\nu = E_2 - E_1 = \frac{m e^4}{8 h^2 \epsilon_0^2} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right),$$

а частоти випромінювань:

$$\nu = \frac{m e^4}{8 \epsilon_0^2 h^3} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) = R c \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right),$$

де $R = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ – стала Ридберга,

c – швидкість світла у вакуумі.

Для воднеподібних атомів – раз іонізованого атома гелію He^+ , двічі іонізованого атома літію – Li^{++} і т.д.:

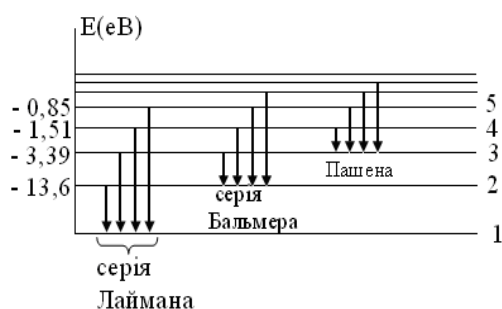


Рисунок 74

$$\nu = z^2 R c \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right),$$

де Z – порядковий номер елемента.

Спектр енергії водню зображено на (рис. 74)

1) $n_1=1, n_2=2, 3, 4, \dots$, ультрафіолетові лінії серії Лаймана.

2) $n_1=2, n_2=3, 4, 5 \dots$, видимі лінії серії Бальмера.

3) $n_1=3, n_2=4, 5, 6, \dots$, серії Пашена (інфрачервоні лінії).

Постулати Бора дали можливість пояснити властивості атома водню (його розмір, спектральні лінії, енергію іонізації). Проте теорія Бора не змогла пояснити властивості інших атомів. Для послідовності обґрунтування властивостей атомів та інших об'єктів мікросвіту була створена нова фізична теорія – квантова механіка.

8.2 Будова атома

Ядра всіх атомів складаються з протонів (електричний заряд $+e$, маса $m_p=1,67 \cdot 10^{-27}$ кг) і нейтронів (заряд рівний нулю, маса $m_n=1,675 \cdot 10^{-27}$ кг). Спільна назва протонів і нейтронів – *нуклони*. Нуклони – складові частинки ядра. Між нуклонами діють короткодійні сили притягання – *ядерні сили*. Кількість протонів у ядрі позначається Z і збігається з порядковим номером елемента в таблиці Менделєєва. Заряд ядра дорівнює Ze . Кількість нейтронів у ядрі позначається N . Загальна кількість нейтронів і протонів у ядрі позначається A і називається масовим числом $A = Z + N$.

Атомні ядра позначають символами. Якщо X відповідає символу атома хімічного елемента в періодичній системі Менделєєва, то символ ядра цього атома має вигляд ${}^A_Z X$.

Наприклад, ${}^1_1 H$ - ядро атома водню, ${}^4_2 He$ - ядро атома гелію. Атоми, які мають однаковий заряд ядра, але різну масу, називаються *ізотопами*. Ізотопи ядра хімічного елемента мають однакове число протонів, але різне число нейтронів у складі ядра. Всі ізотопи одного і того самого елемента мають однакові хімічні властивості, але можуть відрізнятися радіоактивністю. Наприклад: ${}^2_1 H$ - дейтерій і ${}^3_1 H$ - тритій є ізотопами водню (тритій радіоактивний).

Застосування ізотопів

1. Метод мічених атомів (біологія, фізіологія, медицина, промисловість, археологія).
2. Джерела γ -променів («кобальтова гармата» з ізотопом ${}^{60}_{27} Co$).
3. Прискорення мутації – для штучного відбору (в сільському господарстві).

8.3 Радіоактивність. Закони радіоактивного розпаду

Радіоактивністю називають самовільне (спонтанне) перетворення ядер нестійких ізотопів одних елементів в ядра ізотопів інших елементів, що зумовлено внутрішніми причинами та супроводжується α - β - γ - випромінюванням, а також інших частинок (нейтронів, протонів). До радіоактивних процесів належать:

- а) α – розпад;
- б) β – розпад;
- в) γ – випромінювання;
- г) спонтанний поділ тяжких ядер;

д) протонна радіоактивність;

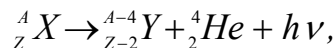
Радіоактивність, яка спостерігається в ядрах, що існують у природних умовах, називається *природною*.

Радіоактивність ядер, які отримані за допомогою ядерних реакцій, називається *штучною*.

Природні радіоактивні перетворення ядер, які відбуваються самочинно, називаються *радіоактивним розпадом*.

α – *розпад*: перетворення атомних ядер, яке супроводжується випусканням α – частинок (ядер гелію ${}^4_2\text{He}$).

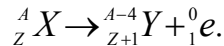
Правило зміщення:



де ${}^A_Z X$ - материнське ядро,

${}^{A-4}_{Z-2} Y$ - дочірнє ядро.

β – *розпад*: випускання ядрами електронів. Правило зміщення:



При β – розпаді номер хімічного елемента переміщується на одну клітинку вправо в періодичній системі Менделєєва.

γ – *розпад*: випромінювання γ – квантів збудженими ядрами, які поглинули деяку енергію. При цьому масове число і порядковий номер не змінюються.

8.4 Властивості радіоактивного випромінювання

α - *випромінювання*:

- а) відхиляються електричним і магнетним полями;
- б) швидкість, з якою вилітає α – частинка, близька 10^7 м/с;
- в) мають мінімальну проникну і максимальну іонізуючу здатність ≈ 250000 пар іонів.

β – *випромінювання*:

- а) відхиляються електричним і магнетним полями;
- б) швидкість, з якою вилітає електрон, порядку 10^8 м/с;
- в) мають малу проникну здатність.

γ – *випромінювання* :

- а) електромагнетне випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 10^{-12}$ м і частотою близькою 10^{20} Гц;
- б) не відхиляються електричним і магнетним полями;
- в) мають максимальну проникну і мінімальну іонізуючу здатність.

У результаті радіоактивного розпаду число ядер, які розпалися N , порівняно з початковим числом N_0 зменшується з часом t за експоненціальним законом:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 2^{-\frac{t}{T}}.$$

Число ядер N , які розпалися за час t , змінюється згідно з законом:

$$N = N_0(1 - e^{-\lambda t}) = N_0(1 - 2^{-\frac{t}{T}}),$$

де λ – стала розпаду пов'язана з періодом піврозпаду T так:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

Період піврозпаду T – це час, за який розпадається половина із загальної кількості атомів радіоактивної речовини. Закон радіоактивного розпаду є статистичним законом. Він справедливий тільки для $N \gg 1$. Передбачити момент розпаду конкретного ядра неможливо: це явище випадкове (атоми «не старіють»).

Дія радіоактивного випромінювання на речовину характеризується дозою іонізуючого випромінювання. Розрізняють такі одиниці випромінювання:

Поглинута доза випромінювання – фізична величина, що дорівнює відношенню енергії поглинутого випромінювання до маси опромінювальної речовини:

$$D = \frac{W}{m}.$$

Одиниця поглинутої дози випромінювання – грей (Гр.): 1Гр=1Дж/кг – доза випромінювання, при якій опромінюваній речовині масою 1кг передається енергія довільного іонізуючого випромінювання 1Дж.

Експозиційна доза випромінювання – фізична величина, що дорівнює відношенню суми електричних зарядів всіх іонів одного знака, створених електронами, звільненими в опромінюваному повітрі (при повному використанні іонізуючої здатності електронів), до маси цього повітря:

$$X = \frac{Q}{m}$$

Одиниця експозиційної дози випромінювання – кулон, поділений на кілограм (Кл / кг), часто користуються позасистемною одиницею – рентген (Р):

$$1Р = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг.}$$

При дозі 1Р в 1м³ сухого повітря при нормальному атмосферному тиску виникає сумарний заряд іонів одного знака за величиною 0,33·10⁻³ Кл.

8.5 Дефект маси, енергія зв'язку. Ядерні реакції

Під енергією зв'язку атомного ядра розуміють енергію, необхідну для повного розчеплення ядра на нуклони без надання їм кінетичної енергії. Енергію зв'язку ядра характеризує величина Δm , яку називають *дефектом маси*.

Під дефектом маси розуміють різницю між сумою мас протонів і нейтронів, які перебувають у вільному стані, і масою утвореного з них

ядра. Якщо ядро з масою $M_{\text{Я}}$ утворене із Z протонів і масою m_p кожний і з $(A-Z)$ нейтронів з масою m_n , то:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{Я}},$$

де Δm – дефект маси ядра визначає енергію зв'язку частинок у ядрі.

$$\Delta E_{\text{зв}} = \Delta mc^2 = (Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{Я}}) \cdot c^2.$$

У ядерній фізиці для обчислення енергії застосовують атомну одиницю енергії (а.о.е.) – величину, яка відповідає енергії однієї атомної одиниці маси:

$$1 \text{ а.о.е.} = c^2 \cdot 1 \text{ а.о.м.} = 9 \cdot 10^{16} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} = 931,44 \text{ МеВ.}$$

$$\text{Отже, } \Delta E_{\text{зв}} = (Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{Я}}) \cdot 931,44.$$

Питома енергія зв'язку – енергія, яка припадає на один кулон:

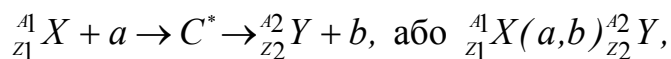
$$\Delta E_{\text{п}} = \frac{\Delta E_{\text{зв}}}{A}.$$

Найбільшу енергію зв'язку (близько 8,7 МеВ на один кулон) мають елементи з номерами від 50 до 60, тому ядра цих елементів найстійкіші.

Велика питома енергія зв'язку свідчить про те, що в ядрах діють специфічні сили притягання, які називаються ядерними силами. Ядерні сили мають ряд характерних властивостей:

- а) вони є силами притягання;
- б) це короткодійні сили, їх дія проявляється на відстані порядку 10^{-15} м (радіус дії ядерних сил);
- в) ядерні сили мають властивість зарядової незалежності: ядерні сили, які діють між протоном і нейтроном, між двома протонами або між двома нейтронами, однакові;
- г) ядерні сили є нецентральними, як наприклад, сили гравітаційні і кулонівські;
- д) ядерні сили мають властивість насичення. Кожен кулон взаємодіє не з усіма нуклонами ядра, а тільки з обмеженим числом найближчих до нього нуклонів.

Ядерні реакції – це перетворення атомних ядер при взаємодії з елементарними частинками, з γ – квантами або між собою. Ядерні реакції записують у вигляді рівняння:



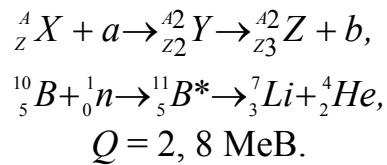
де C^* - проміжне ядро у збудженому стані.

За механізмом взаємодії ядерні реакції можна поділити на два види:

- а) прямі ядерні реакції;
- б) реакції з утворенням проміжного ядра.

Ядерні реакції звичайно мають два етапи: 1) бомбардуюча частинка проникає в ядро–мішень і утворюється проміжне ядро, 2) у середині проміжного ядра нуклони перегруповуються, «зайві» частинки і надлишкова енергія викидається і утворюється нове ядро.

Такі перетворення відбуваються за $10^{-14} - 10^{-15}$ с. Символічно такі етапи можна записати так:



Таку реакцію вперше здійснив у 1919 р. Е. Резерфорд (${}^{14}_7 N(\alpha, p){}^{17}_8 O$).

Всі ядерні реакції характеризуються енергією, яка виділяється або поглинається в процесі їх перебігу. Реакції, що супроводжуються виділенням енергії, називаються екзотермічними, а поглинанням енергії – ендотермічними.

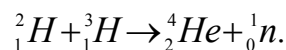
Енергетичний вихід ядерної реакції:

$$\Delta E = \Delta mc^2,$$

де Δm – різниця між сумарною масою частинок і ядер, які вступають в реакцію, та продуктів реакції.

Під час бомбардування ядер важких елементів ($A > 100$) нейтронами відбувається поділ ядер, при цьому випромінюються γ -промені, а також вилітає кілька нейтронів (2 або 3). Нейтрони, які вилітають, у свою чергу можуть викликати поділ нових ядер. В результаті виникає ланцюгова реакція. Для цього необхідно, щоб коефіцієнт розмноження нейтронів K був не менший одиниці. Такі реакції відбуваються в ядерному реакторі.

Ядерна енергія може вивільнитись не тільки при поділі важких ядер, а й при їх злитті – синтезі. Приклад термоядерної реакції – синтез гелію із дейтерію і тритію:



При цьому виділяється 3,5 MeV на нуклон.

Такі реакції протікають при дуже високих температурах – 10^8 К, бо для початку взаємодії ядер атоми мають наблизитись на відстані дії ядерних сил.

Створити такі високі температури зараз можливо тільки на короткий час, використовуючи ядерний вибух (воднева або термоядерна бомба), випромінювання потужного імпульсного лазера, надвисокі електричні струми.

Проблема керованої термоядерної реакції полягає у створенні умов, за яких енергія, що виділяється при синтезі, має не розсіюватися, а витратитись на підтримання температури середовища, у якому відбувається реакція. Речовина при таких температурах перебуває у стані високотемпературної плазми і не повинна контактувати із стінками установки. Одним з методів досягнення потрібних умов затримання плазми є утворення всередині установки магнетного поля спеціальної конфігурації.

Вирішення проблеми керованої термоядерної реакції може дати людству нове джерело енергії.

Приклади розв'язування задач

1. При переході електронів атомів водню з 4-ї стаціонарної орбіти на 2-у випромінюються фотони, які дають зелену лінію в спектрі водню. Визначити довжину хвилі цієї лінії, якщо при випромінюванні фотона атома витрачається енергія $4,04 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Розв'язання

Дано

$$\Delta E = 4,04 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$$

λ - ?

Довжина хвилі в вакуумі: $\lambda = \frac{c}{\nu}$, із формули

$$h \cdot \nu = E_1 - E_2 \text{ отримаємо: } \nu = \frac{E_1 - E_2}{h},$$

$$\text{тоді } \lambda = \frac{hc}{E_1 - E_2} = \frac{hc}{\Delta E}.$$

Підставивши числові значення, дістанемо:

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 6,62 \cdot 10^{-34}}{4,04 \cdot 10^{-19}} = 4,9 \cdot 10^{-7}.$$

Відповідь: $\lambda = 4,9 \cdot 10^{-7} \text{ м}$.

2. Ядро радію ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ викидає α -частинку з енергією 4,78 МеВ і γ -квант з малою енергією. Нехтуючи імпульсом γ -кванта, обчислити швидкості ядра і α -частинки.

Розв'язання

Дано

$$m = 4 \text{ а. о. м.} =$$

$$= 4 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$M = 226 \text{ а. о. м.} =$$

$$= 226 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$E = 4,78 \text{ МеВ} =$$

$$= 4,78 \cdot 1,66 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$$

$$g_{\text{я}} = ? \quad g_{\alpha} = ?$$

Енергія α -частинки мала порівняно з її енергією спокою $E = mc^2$, тому можна використовувати закони збереження імпульсу та енергії у нерелятивістському вигляді. Виражаємо імпульс α -частинки через її енергію:

$$E = \frac{m g_{\alpha}^2}{2}; \quad p = m g_{\alpha} \Rightarrow E = \frac{p^2}{2m} \Rightarrow p = \sqrt{2mE}.$$

Виходячи із закону збереження імпульсу для системи тіл ядро + α -частинка, знаходимо:

$$(M - m) g_{\text{я}} - p = 0.$$

$$\text{Звідси: } g_{\text{я}} = \frac{\sqrt{2mE}}{M - m}; \quad g_{\alpha} = \sqrt{\frac{2E}{m}}.$$

Обчислення:

$$g_{\text{я}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot 4,78 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13}}{(226 - 4)^2 \cdot (1,6 \cdot 10^{-27})^2}} = 2,7 \cdot 10^5 \text{ м/с};$$

$$g_{\alpha} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4,78 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13}}{4 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27}}} = 1,5 \cdot 10^7 \text{ м/с}.$$

Відповідь: $g_{\text{я}} = 270 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, $g_{\alpha} = 15000 \cdot 10^3 \text{ м/с}$.

3. Обчислити дефект маси та енергію зв'язку ядра ${}^1_7\text{N}$.

Розв'язання

Дано	Дефект маси визначається за формулою:
$Z = 7$	$\Delta m = Zm_p + (A-Z)m_n - M_{Я}$
$A = 14$	Дану формулу доцільно перетворити так, щоб до неї входила
$\Delta m - ?$	маса $m_a = M_{Я} + Zm_e$ нейтрального атома, дефект маси якого
$E_{зв} - ?$	визначається так:

$$\Delta m = Zm_H + (A-Z)m_n - m_a$$

де m_H - маса нейтрального атома водню,

$m_e = 0,00055$ а.о.м. - маса електрона.

Використавши табличні значення для ізотопу $^{14}_7N$, знайдемо:

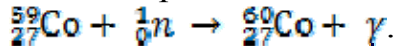
$$\Delta m = [7 \cdot 1,00781 + (14 - 7) \cdot 1,00867 - 14,00304] \text{ а.о.м.} = 0,11232 \text{ а.о.м.} = 0,186 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Енергія зв'язку визначається:

$$E_{зв} = \Delta m c^2 = 0,186 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16} = 1,67 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} = 104,2 \text{ МеВ.}$$

Відповідь: $\Delta m = 0,186 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, $E_{зв} = 104,2 \text{ МеВ}$.

4. Виділяється чи поглинається енергія під час ядерної реакції?



Дано	<i>Розв'язання</i>
$M_1(^{59}_{27}\text{Co}) = 58,95182 \text{ а.о.м.}$	Енергія ядерної реакції: $\Delta E = \Delta m c^2$. Якщо
$M_2(^{60}_{27}\text{Co}) = 58,95182 \text{ а.о.м.}$	Δm виражаємо в а.о.м., то формула буде
$m_n = 1,00893 \text{ а.о.м.}$	мати вигляд:
$\Delta E - ?$	$\Delta E = 931,4 \Delta m \text{ [МеВ]}$.

Якщо енергія виражена в мегаелектрон-

вольтах, а маса в атомних одиницях, то

$$c^2 = 931,4 \text{ МеВ/а.о.м.}$$

Дефект маси дорівнює: $\Delta m = (M_1 + m_n) - M_2$.

Оскільки число електронів до і після реакції зберігається, то замість значень маси ядер скористаємось значеннями мас нейтральних атомів:

$$\Delta m = 58,95182 + 1,00893 - 59,95250 = 0,00825 \text{ а.о.м.}$$

Оскільки $\Delta m > 0$, то буде виділятися така енергія:

$$M(^{60}_{27}\text{Ni}) = 58,95182 \text{ а.о.м.}$$

$$\Delta E = 931,4 \cdot 10^6 \cdot 0,00825 = 7,67 \text{ МеВ.}$$

Відповідь: енергія виділяється.

5. Скільки атомів радіоактивного ізотопу кальцію розкладається за 1 добу у 1г цього ізотопу, якщо період піврозпаду його становить 164 доби?

Дано	<i>Розв'язання</i>
$\mu = 0,04 \text{ кг/моль}$	Визначимо початкову кількість атомів ізотопу:
$m = 0,001 \text{ кг}$	$N_0 = N_A \cdot \frac{m}{\mu}$,
$T_{1/2} = 164 \text{ доби}$	$N_0 = 6,02 \cdot 10^{23} \cdot \frac{0,001}{0,04} = 1,505 \cdot 10^{23} \text{ (атомів)}$.
$t = 1 \text{ доба}$	Використавши закон радіоактивного розпаду,
$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$	маємо:
$\Delta N - ?$	

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}, \quad \Delta N = N_0 - N = N_0(1 - 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}).$$

Кількість атомів, які розклалися:

$$\Delta N = 1,505 \cdot 10^{23} (1 - 2^{-\frac{1}{164}}) = 6,347 \cdot 10^{19} \text{ (атомів)}.$$

Відповідь: $\Delta N = 6,347 \cdot 10^{19}$ (атомів).

6. Визначити к. к. д. атомної електростанції, якщо електрична потужність становить 5000 кВт, витрата U^{235} становить 30 г за добу. Кількість енергії, яка виділяється при поділі одного ядра U^{235} , дорівнює 200 МеВ.

Дано

$$P = 5 \cdot 10^6 \text{ Вт}$$

$$m = 30 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$E_0 = 200 \cdot 10^6 \text{ еВ}$$

$\Delta \eta = ?$

Розв'язання

Знаючи, що 1 моль містить $6,02 \cdot 10^{23}$ атомів, визначимо число атомів, які містяться у 30 грамах.

$$N = N_A \cdot \frac{m}{\mu} = \frac{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 30 \cdot 10^{-3}}{235 \cdot 10^{-3}} = 0,769 \cdot 10^{23} \text{ атомів}.$$

$$\text{ККД: } \eta = \frac{P}{P'},$$

де P – електрична потужність станції,

P' – потужність, що виділяється в атомному реакторі.

$$P' = \frac{200 \cdot 10^6 \cdot 0,769 \cdot 10^{23}}{86400} = 28463 \cdot 10^3 \text{ Вт},$$

$$\eta = \frac{5000 \text{ кВт}}{28463 \text{ кВт}} = 0,176 \text{ або } \eta = 17,6\%$$

Відповідь: $\eta = 17,6\%$.

Задачі для самостійного розв'язання

1. Визначити атомні номери, масові числа і хімічні символи ядер, які утворюються, якщо в ядрах ${}^3_2\text{He}$, ${}^7_4\text{Be}$, ${}^{15}_8\text{O}$ протони замінити нейтронами, а нейтрони – протонами.

Відповідь: ${}^3_1\text{H}$, ${}^7_3\text{Li}$, ${}^{15}_7\text{N}$.

2. Скільки α - і β -частинок утворюється при перетворенні ядра урану ${}^{238}_{92}\text{U}$ в ядро вісмуту ${}^{208}_{82}\text{Bi}$?

Відповідь: шість α -частинок, три β -частинки.

3. Розрахуйте дефект маси Δm і енергію зв'язку $\Delta E_{зв}$ ядра ${}^{11}_5\text{B}$.

Відповідь: $\Delta m = 0,08186$ а.о.м., $\Delta E_{зв} = 76,2$ МеВ.

4. Розрахуйте енергію $E_{зв}$, яку потрібно затратити, щоб відірвати нейтрон від ядра ${}^{23}_{11}\text{Na}$.

Відповідь: $E_{зв} = 12,42$ МеВ.

5. За який час t розпадається $\frac{1}{4}$ початкової кількості ядер радіоактивного ізоотопу, якщо період його піврозпаду $T_{1/2} = 24$ год?

Відповідь: $t = 10,5$ год.

6. За час $t = 8$ діб розпалося $k = \frac{3}{4}$ початкової кількості ядер радіоактивного ізоотопу. Визначити період піврозпаду $T_{1/2}$.

Відповідь: $T_{1/2} = 4$ доби.

7. Атомарний водень, збуджений світлом певної довжини хвилі, при переході в основний стан випромінює тільки три спектральні лінії. Визначити довжини хвиль цих ліній і вказати, до яких серій вони належать.

Відповідь: серія Лаймана – 121,6 Нм, 102,6 Нм, серія Бальмера – 656,3 Нм.

8. Вичислити енергію фотона, що випромінюється при переході електрона в атомі водню з третього енергетичного рівня на перший.

Відповідь: $E = 12,1$ еВ.

9. В результаті захоплення нейтрона ядром ізотопу азоту ${}^7\text{N}^{14}$ утворюється деякий елемент і α -частинка. Написати реакцію і визначити невідомий елемент.

Відповідь: ${}^5\text{B}^{11}$.

10. Знайти продукт реакції, який утворюється бомбардуванням ядер ізотопу магнію ${}_{12}\text{Mg}^{24}$ α -частинками, якщо відомо, що при цьому вилітає нейтрон.

Відповідь: ${}_{14}\text{Si}^{27}$.

11. Атомна електростанція потужністю $P = 1000$ МВт має ККД 20%. Яка маса m витраченого за добу урану - 235? Вважайте, що при кожному поділі ядра урану виділяється енергія рівна 200 МеВ.

Відповідь: 5,3 кг.

12. При бомбардуванні за допомогою α – частинок бору ${}^11_5\text{B}$ спостерігається вилітання нейтронів. Напишіть рівняння ядерної реакції, що спричиняє вилітання одного нейтрона. Який енергетичний вихід W цієї реакції?

Відповідь: $W = 0,17$ МеВ.

13. У результаті кількох α - і β – розпадів радіоактивний атом ${}^{232}_{90}\text{Tl}$ перетвориться на атом ${}^{212}_{83}\text{Bi}$. Скільки сталося α – розпадів? β – розпадів?

Відповідь: 5 α – розпадів, 3 β – розпадів.

14. Який період T піврозпаду ізотопу, якщо за добу розпадається в середньому 900 атомів із 1000? 750 атомів із 1000? 1 атом із 1000?

Відповідь: 7,2 год, 12 год, 693 доби.

15. Обчисліть енергію зв'язку E_{36} і питому енергію зв'язку $\frac{E_{36}}{A}$ для ядер ${}^7_3\text{Li}$ і ${}^{27}_{13}\text{Al}$.

Відповідь: 39,2МеВ 5,6 МеВ

Лабораторні роботи Лабораторна робота № 1

Дослідження прямолінійного руху тіл в полі тяжіння за допомогою машини Атвуда

Мета роботи: дослідити закони руху тіл в полі земного тяжіння.

Прилади і матеріали: машина Атвуда, набір важків, додаткові тягарці, електронний секундомір.

Теоретичні відомості

Машина Атвуда призначена для вивчення законів прямолінійного рівномірного та рівноприскореного рухів і, зокрема, для визначення прискорення вільного падіння тіл.

Будова машини Атвуда зображена на рис.1. Принцип її дії ґрунтується на використанні законів вільного падіння тіл в повітрі. Через нерухомий блок, при обертанні якого силою тертя в осі можна знехтувати, перекинута нитка з двома однаковими вантажами масою M кожний. В цьому випадку система знаходиться в рівновазі. Якщо на один з вантажів покласти невеликий додатковий тягарець масою m , то система, що складається з двох вантажів і тягарця, одержить деяке прискорення a під дією сили $F = m g$ і на шляху S_1 буде рухатись з цим прискоренням.

Кільцем P дія додаткового тягарця m припиняється, і вантажі, рухаючись рівномірно, пройдуть шлях S_2 .

Знайдемо закон руху вантажу M , розташованого праворуч. Для цього скористаємося системою координат, початок якої знаходиться на осі блока, а вісь ox напрямлена вертикально вниз. На вантаж M діють дві сили: сила тяжіння

$(M+m)g$ та сила натягу правої частини нитки T_1 . Запишемо другий закон Ньютона:

$$(M + m) g - T_1 = (M + m) a, \quad (1)$$

де a – прискорення вантажу M .

Тепер застосуємо другий закон Ньютона до вантажу M , що розташований ліворуч. Оскільки нитка нерозтяжна, прискорення лівого вантажу за абсолютним значенням рівне прискоренню правого, але направлене в протилежний бік, тобто воно рівне a . Натяг лівого кінця нитки позначимо через T_2 , тоді :

$$M g - T_2 = - M a. \quad (2)$$

У випадку невагомego блока і відсутності сили тертя в його осі :

$$T_1 = T_2. \quad (3)$$

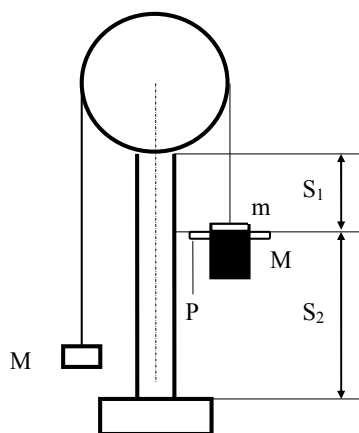


Рисунок 1

З рівнянь (1), (2) та (3) знайдемо прискорення системи :

$$a = \frac{mg}{2M + m}. \quad (4)$$

Таким чином, вважаючи g відомим та проводячи досліди з різними вантажами M і додатковими тягарцями m , за формулою (4) можна вирахувати прискорення a і здійснити експериментальну перевірку другого закону Ньютона.

Машина Атвуда дає можливість також визначити прискорення вільного падіння g , що й складає основне завдання даної роботи. Для цього з формули (4) знайдемо g :

$$g = \frac{2M + m}{m} a. \quad (5)$$

Прискорення a безпосередньо виміряти неможливо, але його легко вирахувати, виміривши шлях S_1 , пройдений вантажем M при рівноприскореному русі, а також шлях S_2 рівномірного руху та час t його проходження.

Для рівноприскореного руху при умові, що початкова швидкість V_0 рівна нулю, пройдений шлях можна знайти, маючи кінцеву швидкість та прискорення:

$$S_1 = \frac{V^2}{2a}. \quad (6)$$

Кінцева швидкість V набувається вантажем M в момент проходження кільця P , яке припиняє дію додаткового тягарця. Далі з цією швидкістю вантаж рухається рівномірно і за час t проходить шлях S_2 . Тому:

$$V = \frac{S_2}{t}. \quad (7)$$

З формул (6) і (7) знаходимо прискорення a , підставляючи його значення в вираз (5), остаточно одержуємо:

$$g = \frac{2M + m}{m} \cdot \frac{S_2^2}{2S_1 t^2}, \quad (8)$$

де M – маса великого вантажу;

m – маса додаткового тягарця;

S_1 – шлях, що проходить вантаж $(M + m)$ при рівноприскореному русі;

S_2 – шлях, пройдений вантажем M при рівномірному русі;

t – час проходження шляху S_2 .

Порядок виконання роботи

1. Підготувати прилад до вимірювань, для чого необхідно:

- змістити правий вантаж у верхнє положення, покласти на нього додатковий тягарець та впевнитись, що система знаходиться в стані спокою;
- натиснути клавішу “ПУСК” і переконатись, чи прийшла система в

рух, чи був затриманий на середньому кронштейні додатковий тягарець, чи виміряв мілісекундомір час проходження правим вантажем шляху S_2 та чи була система загальмована в кінці цього шляху;

- звільнити клавішу “СБРОС” та перевірити чи відбулось обнуління показів вимірювача і звільнення електромагнетного блокування ролика;
 - змістити правий вантаж у верхнє положення і звільнити клавішу “ПУСК”, а також перевірити виникнення повторного блокування ролика.
2. На правий вантаж встановити один з додаткових тягарців.
 3. Сумістити нижню грань правого вантажу з рисою, що нанесена на верхньому кронштейні.
 4. Виміряти з допомогою шкали колонки шляхи рівноприскореного руху S_1 та рівномірного руху S_2 .
 5. Натиснути клавішу “ПУСК”.
 6. Записати значення часу t ; вимірювання повторити не менше 5 разів.
 7. Дані всіх вимірювань занести в таблицю:

Номер досліджу	M, кг	m, кг	S ₁ , м	S ₂ , м	t, с	g, м/с ²	Δg, м/с ²	ε, %

Обробка результатів експерименту та їх аналіз

Визначити середнє значення часу руху вантажу на шляху S_2 за формулою:

$$t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i,$$

де n – кількість виконаних вимірювань;

t_i – час i -того вимірювання.

За допомогою формули (8) вирахувати значення прискорення вільного падіння тіл.

Визначити абсолютну та відносну похибки вимірювань.

Контрольні запитання

1. Механічний рух як найпростіша форма руху матерії. Відносність руху. Види руху.
2. Кінематика матеріальної точки: траєкторія, шлях, переміщення, швидкість, прискорення. Поступальний рух твердого тіла.
3. Проаналізуйте можливі джерела та причини похибок при визначенні g .

Лабораторна робота № 2

Визначення коефіцієнта тертя кочення

Мета роботи: експериментальне вивчення основних закономірностей тертя кочення.

Прилади і матеріали: спеціальна установка; набір досліджуваних тіл.

Опис установки:

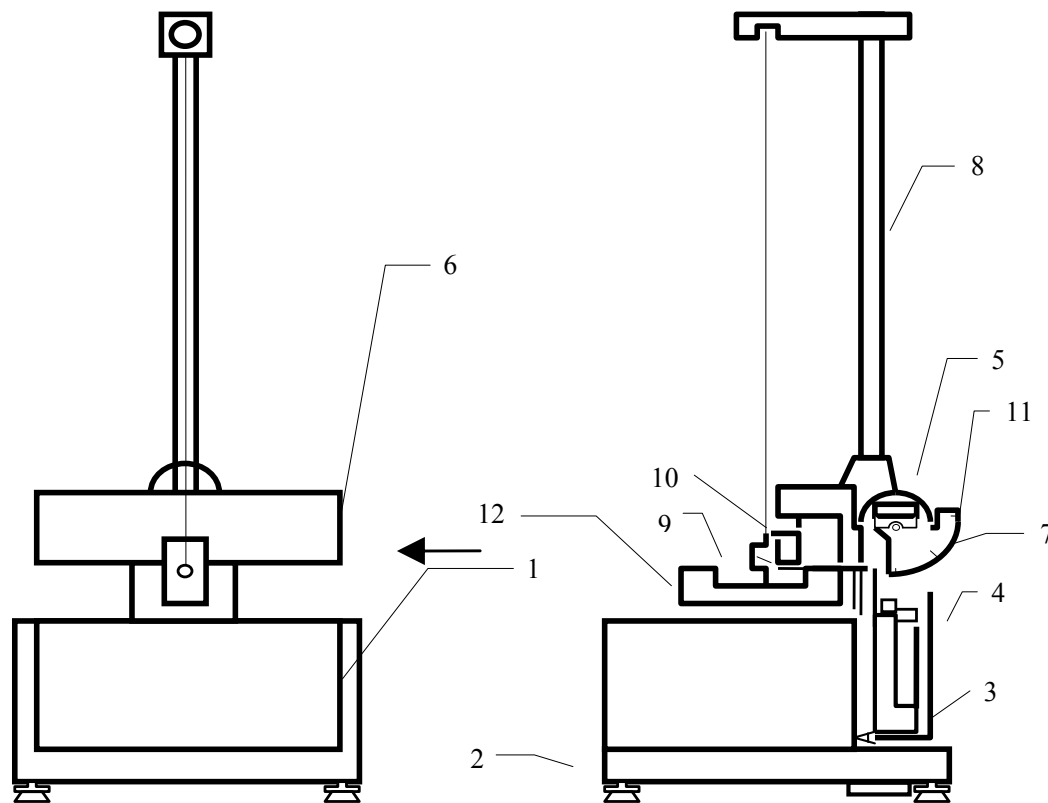


Рисунок 1

Установка для вимірювань являє собою похилий маятник, зображений на рис.1. До підставки 2, що має чотири гвинтових ніжки, прикріплені мілісекундомір 1 та труба 3 зі змонтованим на ній корпусом 4, з'єднаним через черв'ячну передачу з кронштейном 5, який має дві шкали 6 та 7. До кронштейна прикріплена колонка 8, на якій підвішується з допомогою нитки куля з водилом 9, та є пристрій 10 для закріплення досліджуваних зразків. Фотоелектричний датчик 12 служить для підрахунку коливань маятника.

Теоретичні відомості

Тертя кочення обумовлюється: а) втратами на пружний гістерезис, що зв'язаний зі стисненням матеріалу під дією навантаження попереду тіла, яке котиться; б) затратами роботи на деформацію матеріалу при формуванні валика попереду тіла, що котиться; в) подолання "місточків зчеплення".

Причину виникнення тертя кочення можна проаналізувати на прикладі кочення кулі або циліндра на площині (рис. 2). При такому коченні в точці дотику виникають пружні або пластичні деформації.

У першому наближенні для сили тертя кочення виконується закон Кулона:

$$\vec{F}_{\text{коч}} \approx f_k \cdot \frac{\vec{N}}{r}, \quad (1)$$

де r – радіус поверхні тіла, що котиться;

f_k – коефіцієнт тертя кочення.

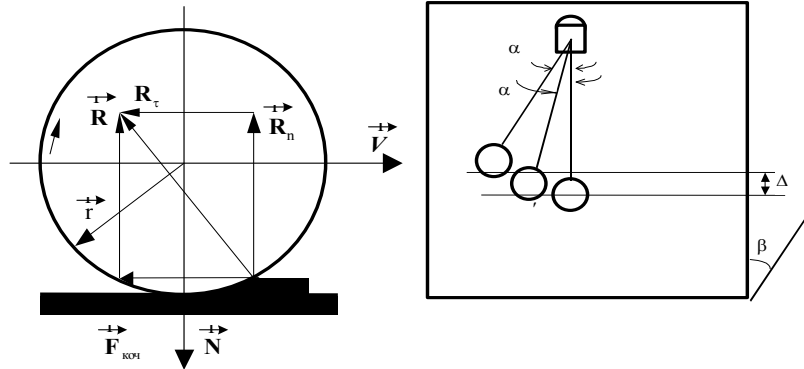


Рисунок 2

Рисунок 3

Тертя кочення значно менше, ніж тертя ковзання. При ньому набагато менше зношуються поверхні, які труться, та в багато разів знижується дисипація механічної енергії. Тому скрізь, де це можливо, тертя ковзання замінюють тертям кочення.

У всіх реальних механічних процесах та системах мають місце сили тертя, дія яких призводить в своєму результаті до перетворення енергії в тепло.

При переміщенні одного тіла відносно іншого по його поверхні виникає опір, що характеризується цілим рядом явищ, в тому числі силою тертя. Розрізняють силу зовнішнього тертя як силу опору, тангенціальну відносно переміщення двох твердих тіл при їх дотикові, і силу внутрішнього тертя як силу опору, тангенціальну відносно переміщення шарів середовища один відносно одного.

Сила тертя визначається коефіцієнтом тертя f . Спостереження показують, що його величина не є сталою, а залежить від матеріалу поверхні, від її мікрогеометричного профілю, наявності мастила, газового середовища та багатьох інших факторів.

У даній роботі коефіцієнт тертя кочення кулі по площині визначається методом похилого маятника. Куля радіусом r (рис. 3), яка підвішена на нитці, спирається на похилу площину, кут нахилу якої β можна змінювати. Якщо кулю вивести з положення рівноваги, вона почне перекочуватись по площині, здійснюючи затухаючі коливання під дією зовнішнього тертя.

$$f = \frac{r(\alpha_0 - \alpha_n)}{4n} \operatorname{tg} \beta, \quad (2)$$

де α_0 та α_n – кути відхилення першого та n -го коливань маятника в радіанах;

r – радіус кульки ;

β – кут нахилу площини коливань маятника до горизонту в градусах;

n – число повних коливань.

Отже, при умові певних наближень коефіцієнт тертя кочення між кулькою та площиною досить просто може бути виражений через експериментально вимірювальні величини α , β , r , n .

Порядок виконання роботи

1. Вибрати кульку певного матеріалу, заміряти її радіус та закріпити на підвісі.
2. Встановити відповідну плоску пластинку.
3. Похилий маятник встановити під кутом $\beta_1 = 60^\circ$ до горизонту.
4. Відхилити кульку на кут $\alpha_0 = 4 \div 5^\circ$ від вертикалі і відпустити, даючи можливість їй здійснити $n = 10$ (або 15 чи 20) коливань.
5. Заміряти кут α_n відхилення маятника після n коливань.
6. Всі дані занести в таблицю, виразивши кути α_0 та α_n в радіанах.
7. Повторити всі заміри для даної пари матеріалів кулька-пластинка $3 \div 5$ разів.
8. Встановити кут нахилу площини коливань маятника за п.3 $\beta_2 = 45^\circ$ і проробити вимірювання за п.п. 4-7, потім повторити те саме при $\beta_3 = 30^\circ$.

Обробка результатів експерименту

1. За формулою (2) вирахувати коефіцієнт f тертя кочення для кожного вимірювання фіксованих значень кута β .
2. Вирахувати середнє значення f в межах серії вимірювань, тобто при кожному фіксованому значенні кута нахилу $\beta_1, \beta_2, \beta_3$.
3. Вирахувати загальне середнє значення коефіцієнта тертя кочення, абсолютну та відносну похибки експерименту.
4. Проаналізувати результати та зробити висновки про позитивні і негативні сторони даного методу вимірювання коефіцієнта тертя кочення і точність одержаних результатів.

Контрольні запитання

1. Опишіть фізичні причини, що призводять до виникнення сил тертя.
2. Запишіть та поясніть закони, які описують тертя ковзання, кочення.
3. Наведіть приклади корисного та шкідливого проявлення тертя з галузі Вашої майбутньої спеціальності.

Лабораторна робота № 3

Вимірювання електричних опорів і вивчення залежності опору металу від температури

Мета роботи: навчитись вимірювати опори провідників з допомогою мостових схем; вивчити залежність опору металів від температури.

Прилади та матеріали: набір вимірюваних резисторів; магазин еталонних резисторів; джерело постійного струму; універсальний міст типу МВУ-49; термостат і термометр; з'єднувальні провідники.

Теоретичні відомості

Електричним струмом називається направлений рух електричних зарядів. Цьому рухові перешкоджає електричний опір провідників. Розглянемо класичну електронну теорію металів, яка, не дивлячись на деякі недоліки, якісно на хорошому рівні дає пояснення основних законів електричного струму.

Визначимо густину струму j , яка виникає в металі під дією електричного поля з напруженістю E . Електрони, здійснюючи тепловий хаотичний рух, в той же час під дією електричного поля рухаються проти нього. Направлений рух електронів в електричному полі називається дрейфом. Електричне поле прискорює електрони, і величина цього прискорення відповідно до другого закону Ньютона буде пропорційною діючій силі: $\vec{a} = \frac{e}{m} \vec{E}$, тому в кінці вільного пробігу його швидкість буде дорівнювати:

$$v_{max} = \frac{eE}{m} \tau.$$

Оскільки електрони між ударами рухаються рівноприскорено, то середнє значення дрейфової швидкості становитиме половину максимальної:

$$v_{dr} = \frac{1}{2} \cdot \frac{eE}{m} \tau.$$

Якщо концентрація електронів дорівнює n , то за одиницю часу через одиничний переріз пройде заряд, який буде знаходитись в об'ємі паралелепіпеда з одиничним перерізом і довжиною v_{dr} :

$$j = en v_{dr} = en \frac{1}{2} \cdot \frac{eE}{m} \tau = \frac{e^2 n \tau}{2m} E.$$

Густина струму пропорційна напруженості поля E , а це і є закон Ома в диференціальній формі:

$$j = \delta \cdot E, \quad (1)$$

де δ – питома електропровідність середовища: $\delta = \frac{1}{\rho}$,

ρ – питомий опір середовища.

Для визначення питомого опору використаємо формулу $\rho = \frac{2m}{ne^2\tau}$, яка показує, що питомий опір тим менший, чим більша концентрація електронів провідності і чим більший час вільного пробігу τ .

Це пояснюється тим, що чим більше τ , тим меншу перешкоду мають процеси розсіювання для напрямленого руху електронів.

Питомий електричний опір чисельно дорівнює опору R виготовленого із даної речовини прямолінійного провідника з постійною по довжині площею перерізу S , рівною одиниці, і довжиною l , рівною одиниці:

$$\rho = R \frac{S}{l}.$$

Для більшості металів при температурах, близьких до кімнатної, питомий опір змінюється пропорційно абсолютній температурі T :

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha T). \quad (2)$$

Із формули (2) слідує, що температурний коефіцієнт опору :

$$\alpha = \frac{\rho_t - \rho_0}{\rho_0 t^0} = \frac{\Delta \rho}{\rho_0 t^0}. \quad (3)$$

Він вказує на відносний приріст питомого опору при збільшенні температури на один градус.

Вимірювання опору резисторів має широке практичне значення. У залежності від призначення резисторів, електричні опори у них можна розділити на три групи: малі - до 1 Ом (опори амперметрів, шунтів, обмоток трансформаторів і т.п.), середні 1- 100 кОм (опори вольтметрів і т.п.), великі - 100 кОм і більше (опори ізоляційних матеріалів, кераміка і т.п.).

Методи вимірювання електричних опорів залежать від їх величин. При вимірюванні малих опорів слід ліквідувати вплив на результати вимірювань з'єднувальних провідників, контактів і термо ЕРС. Тоді, як при вимірюванні середніх опорів, величинами додаткових опорів (як правило не перевищують $10^{-4} - 10^{-2}$ Ом) можна знехтувати. При вимірюванні великих опорів необхідно враховувати об'ємні і поверхневі опори, вплив температур і вологості середовища.

Скориставшись законом Ома для ділянки кола, можна виміряти невідомий опір R_x за допомогою вольтметра і амперметра згідно зі схемою на рис. 2 і 3.

Цей метод покладений в основу дії авометрів, за допомогою яких можна виміряти напругу, силу струму, опір. Але оскільки при такому методі вимірювання відбувається спад напруги на вольтметрі та амперметрі, то метод вважається наближеним.

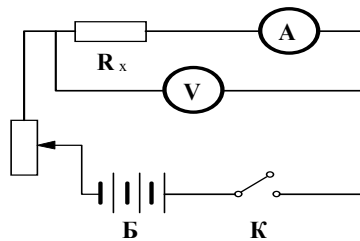


Рисунок 2

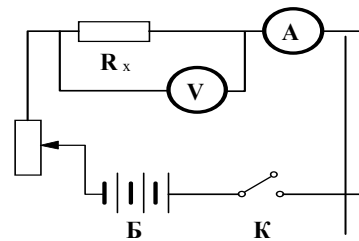


Рисунок 3

Хід роботи:

1. Скласти схему (рис. 3).

2. Виміряти напругу і силу струму при різних значеннях опору реостата.

3. За формулою $R_x = \frac{U}{I}$ знайти значення опору.

4. Скласти таблицю і занести в неї всі вимірювання і проведені розрахунки. Зробити відповідні узагальнення отриманих результатів.

Лабораторна робота № 4

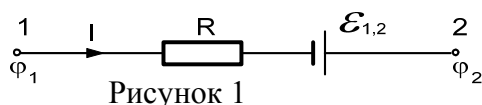
Вивчення законів постійного струму

Мета роботи: перевірка закону Ома для неоднорідної ділянки кола.

Прилади і обладнання: джерело струму на 6 В, два джерела на 1,5 В, вольтметр, амперметр, реостати.

Теоретичні відомості

Електричний струм - упорядкований рух електричних зарядів. У металах - це рух електронів проти поля, в електролітах – іонів різних знаків у протилежних напрямках, у газах – електронів та іонів, у напівпровідниках - електронів і дірок. Для збудження електричного струму в тілах треба створити електричне поле. Щоб струм був тривалим, енергія поля повинна підтримуватись сталою. Це здійснюється за допомогою джерела струму.



Закон Ома у формі $U=IR$ справджується лише для однорідної ділянки кола, тобто такої, на якій немає стрибків потенціалі за рахунок контактних явищ або дії електрорушійних сил.

Розглянемо неоднорідну ділянку кола 1-2 (рис. 1), на кінцях якої діє різниця потенціалів $\varphi_1 - \varphi_2$. Е.р.с., що діє на даній неоднорідній ділянці кола, позначимо через $\varepsilon_{1,2}$.

Знайдемо напрям струму ($\varphi_1 > \varphi_2$). Тоді $\varepsilon_{1,2} > 0$, якщо вона діє в напрямі струму (позначено стрілкою). Скористаємось законом збереження і перетворення енергії. Оскільки провідники нерухомі, то робота dA електростатичних і сторонніх сил, яка виконується при переміщенні заряду dq на ділянці 1-2, дорівнює кількості тепла dQ , яке виділилось під час проходження заряду dq .

Тому можна записати:

$$dA = \varepsilon_{1,2} \cdot dq + (\varphi_1 - \varphi_2) \cdot dq, \quad dQ = I^2 R dt = IR dq$$

Прирівнявши праві частини цих рівнянь, будемо мати:

$$IR = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{1,2},$$

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{1,2}}{R}. \quad (1)$$

Це - закон Ома для неоднорідної ділянки кола.

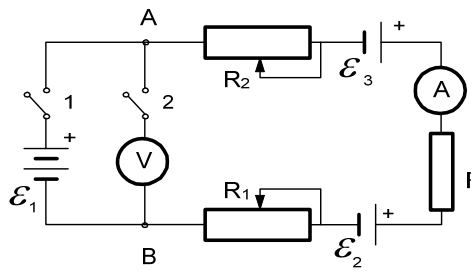


Рисунок 2

Якщо неоднорідна частина кола складається з кількох ділянок, то формулу (1) можна узагальнити на будь-яке число ділянок:

$$I \cdot \sum_{i=1}^n R_i = (\varphi_1 - \varphi_2) + \sum_{i=1}^n \varepsilon_i, \quad (2)$$

де $\sum_{i=1}^n R_i$ — загальний опір усієї

ділянки кола;

$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i$ — алгебраїчна сума е.р.с., що діють на цій ділянці.

Хід роботи

1. Скласти електричне коло за схемою, показаною на рис. 2.
2. Замкнути вимикач 1, потім 2. Резисторами R_1 і R_2 добитися значення сили струму 0,3 А.
3. Виміряти значення I , U_{AB} , R_1 , R_2 , R_3 . Результати вимірювань занести до таблиці, яку слід намалювати самостійно.
4. Обчислити величини, які входять до лівої і правої частини рівняння (2):

$$x = I(R_1 + R_2 + R_3),$$

$$y = U_{AB} + \varepsilon_1 + \varepsilon_2.$$

При цьому слід врахувати знаки ε_1 і ε_2 .

5. Зміною опорів R_1 , R_2 , R_3 підібрати в колі струми 0,35 А; 0,40 А; 0,45 А та провести необхідні обчислення згідно з пунктами 3, 4.
6. Обчислити похибки вимірювань за класом точності вимірювальних приладів та перевірити рівність (2). Зробити відповідні висновки.

Контрольні запитання

1. За яких умов при перевірці закону Ома для неоднорідної ділянки кола можна знехтувати внутрішнім опором амперметра?
2. Чому можна нехтувати внутрішніми опорами джерел струму?
3. Вказати межі застосування закону Ома.

Лабораторна робота №5

Дослідження кривих намагнічування та петель гістерезису ферромагнетиків з допомогою осцилографа

Мета роботи: зняття кривих намагнічування різних ферромагнетиків та вивчення особливостей їх петель гістерезису.

Прилади та матеріали: набір ферромагнетних зразків з намотаними на них намагнечувальними та індикаторними котушками, осцилограф, реостат, конденсатор.

Теоретичні відомості

Особливий клас магнетиків складають феромагнетики, для яких характерна наявність областей спонтанного намагнетчування, які називаються доменами. У межах кожного домену феромагнетик спонтанно намагнетчений до насичення і має певний магнетний момент. Напрямки цих моментів для різних доменів різні, тому при відсутності зовнішнього магнетного поля результуючий момент всього тіла дорівнює нулю. Розміри доменів складають біля кількох мікрометрів.

Феромагнетикам властива важлива особливість, яка подібна до запам'ятовування, тобто стан феромагнетика залежить не тільки від напруженості магнетного поля в даний момент, але й від того, які зміни в магнетному полі були раніше.

Тому в загальному випадку індукція магнетного поля B феромагнетика є складною функцією напруженості поля H .

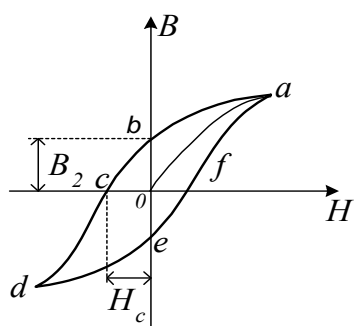


Рисунок 1

Розглянемо цю залежність. Якщо повністю розмагнетчений феромагнетний зразок внести в магнетне поле, то при рівномірному збільшенні напруженості магнетного поля залежність B від H зображається ділянкою oa (рис.1), яка носить назву основної кривої намагнетчування.

При подальшому збільшенні напруженості поля H ця крива переходить в лінійну залежність, оскільки намагнетченість досягає насичення і залишається сталою, а B зростає тільки за рахунок збільшення H , при зменшенні H до нуля крива розмагнетчування не збігається з кривою oa , а пройде значно вище - крива av . Індукція $B_2 = ov$ називається залишковою.

Для знищення залишкової намагнетченості необхідно прикласти обернене поле напруженістю $H_c = oc$, яка називається коерцитивною силою.

При подальшому збільшенні оберненого поля знову досягається насичення. Якщо від точки насичення d зменшувати магнетне поле до нуля, а далі, змінивши напрямок H , збільшувати поле, одержимо криву намагнетчування $defa$. Замкнена крива $abcdefa$ носить назву петлі гістерезису. Явище гістерезису обумовлене доменною структурою феромагнетиків. Для середовища магнетне поле кількісно оцінюється відносною магнетною проникністю

$$\mu = \frac{B}{B_0} = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (1)$$

де B – індукція магнетного поля в речовині;

B_0 – індукція зовнішнього поля (намагнетчувального).

У зв'язку з тим, що в феромагнетиках залежність B від H неоднозначна, поняття відносної магнетної проникності μ застосовується лише до основної кривої намагнетчування і, як впливає з вигляду цієї

кривої, в свою чергу залежить від H .

Величини B_2 , H_c , μ є основними характеристиками феромагнетиків. Якщо коерцитивна сила H_c велика, то феромагнетик називається жорстким, для нього характерна широка петля гістерезису. Феромагнетик з малою H_c (в нього відповідно вузька петля) називають м'яким.

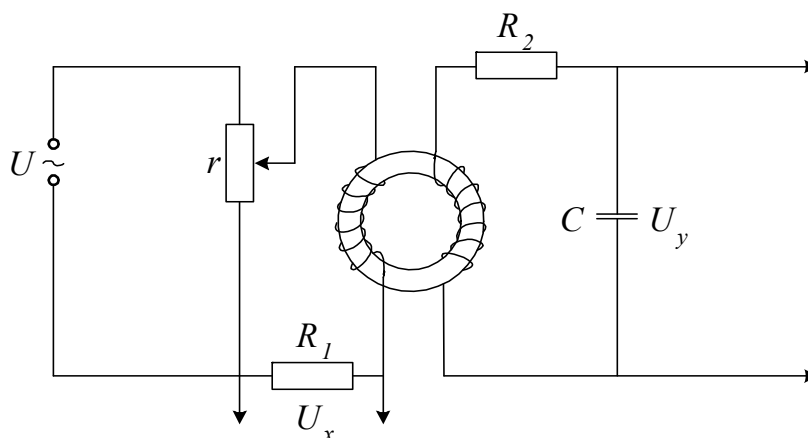


Рисунок 2

На рис. 2. зображена схема для спостереження петлі гістерезису на екрані осцилографа, де осердям тороїда служить досліджуваний феромагнетик. Щоб одержати на екрані осцилографа петлю гістерезису, необхідно на горизонтальні відхиляючі пластини подати напругу U_x , яка пропорційна напруженості магнетного поля H досліджуваного зразка, а на вертикально відхиляючі пластини - напругу U_y , пропорційну векторові магнетної індукції B .

Напруга U_y подається на осцилограф з конденсатора C , який заряджається завдяки ЕРС індукції, що виникає на вторинній обмотці тороїда. Величина ж ЕРС індукції залежить від магнетного потоку, який визначається через вектор індукції магнетного поля. Таким чином, напруга U_y пропорційна магнетній індукції B .

Точні розрахунки дають такі співвідношення:

$$U_x = \frac{R_1 \cdot l_1}{N_1} \cdot H, \quad (2)$$

$$U_y = \frac{SN_2}{R_2 Cl_2} \cdot B, \quad (3)$$

де N_1 – повне число витків первинної (намагнечувальної) обмотки;

l_1 – довжина первинної обмотки;

S – площа перерізу тороїда;

N_2 – повне число витків вторинної (індикаторної) обмотки;

l_2 – довжина вторинної обмотки;

C – ємність конденсатора.

Таким чином, на горизонтально відхиляючі пластини осцилографа подається напруга U_x , пропорційна H , а на вертикально відхиляючі – U_y , пропорційна B . В результаті на екрані одержуємо петлю гістерезису

$$B=f(H).$$

За один період синусоїдальної зміни струму електронний промінь на екрані описує повну петлю гістерезису, а за кожний наступний період точно її повторює. Тому на екрані спостерігається нерухома петля. Збільшуючи потенціометром r напругу U_x , збільшуємо амплітуду H і одержуємо на екрані різні за своєю площею петлі гістерезису.

Порядок виконання роботи

Завдання 1. Зняття основної кривої намагнечування.

1. Зібрати схему за рис. 2.
2. Ввімкнути осцилограф і вивести електронний промінь на центр координатної сітки.
3. За допомогою ручок “Підсилення по вертикалі”, “Підсилення по горизонталі” та потенціометром r добитися, щоб петля гістерезису мала ділянку насичення і займала значну частину екрана.
4. Визначити координати n_x і n_y вершини петлі (координата точки **a** на рис.1.)
5. Зменшити напругу за допомогою потенціометра r ; одержати ряд петель і для кожної з них записати координати вершин. Вимірювання проводити до тих пір, поки петля не стягнеться в точку.
6. Повторити п.п. 5, 6 для інших феромагнетиків.

Завдання 2. Одержання петлі гістерезису.

1. Виконати вимоги згідно з пунктами 1 — 4 “Завдання 1”.
2. Одержати координати 15-20 різних точок петлі в поділках координатної сітки екрана осцилографа.
3. Нарисувати петлю на міліметровому папері, вибравши на осях x і y такий же масштаб, як і на координатній сітці осцилографа.

Контрольні запитання

1. Дайте пояснення явищам, які відбуваються в речовині при внесенні її в магнетне поле.
2. Подайте основи елементарної теорії діа - і парамагнетизму.
3. Назвіть основні особливості магнетних властивостей феромагнетиків.
4. В чому полягає суть явища гістерезису?

Лабораторна робота № 6

Вивчення законів коливання математичного маятника

Мета роботи: вивчити закони гармонічних коливань математичного маятника та переконатись в їх справедливості шляхом зіставлення періодів коливань, одержаних експериментально і теоретичними розрахунками.

Прилади і матеріали: установка для визначення періоду коливань з допомогою фотоелектричного датчика і універсального мілісекундоміра, математичний маятник, набір важків.

Теоретичні відомості

Як відомо, математичним маятником називається матеріальна точка або тіло, розмірами якого можна знехтувати, підвішене на нерозтяжній і невагомій нитці. При малих кутах відхилення (див. рис.1) від положення рівноваги, які не перевищують $7-8^\circ$, маятник здійснює гармонічні коливання. У цьому випадку період коливань визначається за формулою:

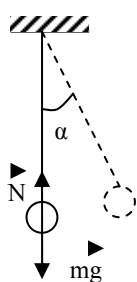


Рисунок 1

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}, \quad (1)$$

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

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка є приладом, що дозволяє з високим ступенем точності визначити період коливань математичного чи фізичного маятників за допомогою фотоелектричного датчика і універсального мілісекундоміра. На цьому приладі визначається час певної кількості повних коливань маятника, а період коливань розраховується за формулою:

$$T = \frac{t}{n}. \quad (2)$$

Порядок виконання роботи

1. Нижній кронштейн з фотоелектричним датчиком встановити в нижній частині колонки, щоб верхня грань кронштейна показувала на шкалі довжину не менше 50 см.
2. Повертаючи верхній кронштейн, розмістити над фотоелектричним датчиком математичний маятник.
3. Обертаючи коробочку на верхньому кронштейні, встановити довжину маятника так, щоб кулька перетинала оптичну вісь фотоелектричного датчика.
4. Ввімкнути прилад перемикачем "Сеть".
5. Відхилити кульку на $2...3^\circ$ від положення рівноваги.
6. Натиснути кнопку "Сброс".
7. Після підрахунку вимірювачем 10...15 коливань натиснути клавішу "Стоп". Записати кількість коливань n та відповідний їм час t .
8. Вимірювання повторити 3... 5 разів.
9. За шкалою колонки визначити довжину маятника l_1 .
10. Всі дані вимірювань внести до складеної таблиці.

Обробка результатів експерименту та їх аналіз

1. Використовуючи дані таблиці завдання 1, за формулою (2) знайти значення періоду T_1 коливання математичного маятника.

2. За даними завдання 2 за формулою (2) знайти період коливання маятника для всіх досліджених кутів відхилення.

Контрольні запитання до захисту лабораторної роботи

1. Як визначається період коливань на лабораторній установці?
2. Як практично здійснюється визначення періоду коливань математичного маятника на лабораторній установці?
3. Як залежить період коливань маятника від кута відхилення маятника від положення рівноваги?
4. Чи залежить період математичного коливання маятника від довжини його підвісу?
5. Чи залежить період коливань математичного маятника від його довжини?
- 6.

Лабораторна робота № 7 **Визначення головної фокусної віддалі оптичних систем**

Мета роботи: оволодіти методикою визначення головної фокусної віддалі лінзи та оптичних систем.

Прилади і матеріали: оптична лава, набір лінз, екран, освітлювач.

Теоретичні відомості

Для точного визначення головної фокусної відстані збірної лінзи чи системи лінз користуються методом Гауса - Бесселя. Розглянемо формулу тонкої збірної лінзи:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}, \quad (1)$$

де d - відстань від предмета до оптичного центра лінзи;

f - відстань від оптичного центра лінзи до чіткого зображення його на екрані;

F - головна фокусна відстань лінзи.

Для цієї мети можна використати формулу (1). Однак величини d і f на практиці визначити точно неможливо, тому що у загальному випадку положення оптичного центра лінзи невідоме. Тому поступаємо таким чином. Спочатку відмітимо, що формула (1) не змінює свого вигляду, якщо d і f поміняти місцями. Це означає, що коли на місці чіткого зображення предмета помістити сам предмет, то його зображення одержимо в тому місці, де раніше знаходився предмет. Говорять, що відстань d і f самоспряжені.

В дійсності переміщувати предмет не обов'язково. Одержавши, наприклад, чітке обернене і збільшене зображення предмета на екрані $A'B'$, вимірюють відстань D від предмета до екрана, а потім, не змінюючи їх положення, переміщують лінзу L в положення L_1 так, щоб одержати чітке обернене й зменшене зображення предмета $A'B'$, що зображено на рис. 1.

Тобто, за допомогою лінзи можна одержати два чітких зображення. Одне з них, збільшене, що знаходиться на відстанні f від лінзи, а друге, зменшене - на відстані d від неї.

Позначимо зміщення оптичного центра лінзи O через a . Величину a можна виміряти переміщенням будь-якої точки лінзи L , оскільки при її рухові положення оптичного центра відносно лінзи не змінюється. Ця обставина дозволяє подолати відмічене вище утруднення, оскільки переміщення самого оптичного центра лінзи можна замінити переміщенням будь-якої мітки на штативі цієї лінзи.

З рис.1 випливає:

$$D = d + f, \quad a = f - d;$$

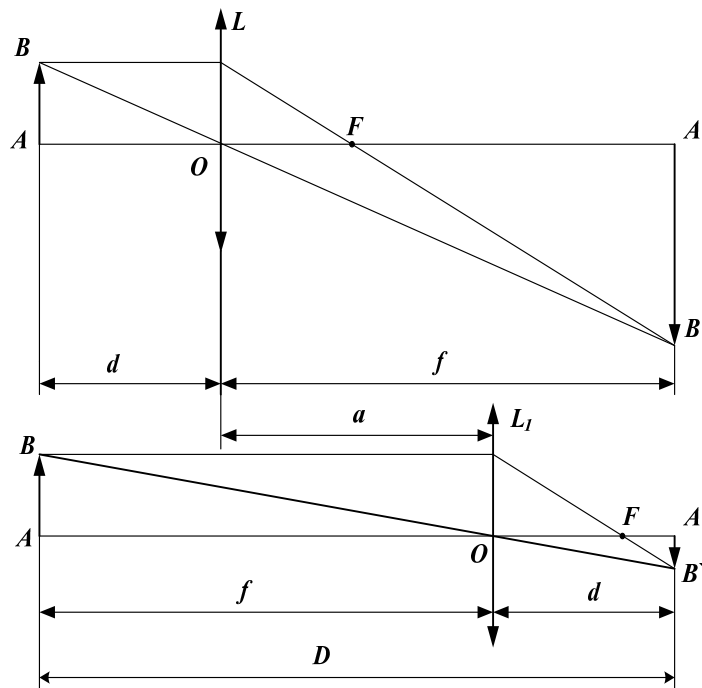


Рисунок 1

Звідси знаходимо:

$$f = \frac{D+a}{2}, \quad d = \frac{D-a}{2}.$$

Підставивши значення d і f в формулу (1), одержуємо:

$$F = \frac{D^2 - a^2}{4D}. \quad (2)$$

Установка для виконання роботи змонтована на оптичній лаві, де розташовані освітлений предмет, екран та рухомий штатив для закріплення лінз.

Хід роботи

Визначення головної фокусної віддалі збиральної лінзи.

1. Закріпити досліджувану лінзу в штативі.
2. Ввімкнути світловач. Переміщуючи лінзу, добитись чіткого зображення предмета на екрані і зафіксувати положення мітки на штативі лінзи.

3. Переміщуючи лінзу в іншу сторону, добитись нового чіткого зображення предмета на екрані і зафіксувати це положення мітки.
4. Знайти віддалі D і a . Результати занести в таблицю.
5. Виконати пункти 1...4 для другої збірної лінзи.

Обробка результатів експерименту

1. За формулою (2) знайти головні фокусні відстані обох досліджуваних збиральних лінз.
2. За формулою (2) знайти головну фокусну відстань оптичної системи двох збиральних лінз.
3. Переконайтесь, що при дотику двох тонких лінз загальна оптична сила системи дорівнює сумі оптичних сил обох лінз:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2}. \quad (3)$$

4. За формулою (2) розрахувати головну фокусну відстань оптичної системи з розсіювальною лінзою.
5. Використовуючи співвідношення (3), вирахувати головну фокусну відстань розсіювальної лінзи.
6. Результати всіх розрахунків занести в таблицю, знайти похибки вимірювань, зробити висновки.

Дослід	$D \pm \Delta D$, см	$a \pm \Delta a$, см	$F \pm \Delta F$, см	ε , %
1 збиральна				
2 збиральна				
3 розсіювальна				
система 1 - 2				
система 1 – 3				

Контрольні запитання для захисту лабораторної роботи

1. Яке означення можна дати: тонкої лінзи, оптичного центра, оптичної осі, фокальній площині, головним фокусам та оптичній силі лінзи?
2. Побудувати зображення предмета в тонкій збиральній лінзі, розмітивши предмет перед фокусом лінзи і між фокусом та лінзою.

Лабораторна робота № 8

Визначення довжини світлової хвилі за допомогою дифракційної решітки

Мета роботи: вивчити явище дифракції на щілині і дифракційній решітці; освоїти методику визначення довжини світлової хвилі за допомогою дифракційної решітки.

Прилади і матеріали: гоніометр, дифракційна решітка, джерело світла.

Теоретичні відомості

Явище дифракції світла полягає у відхиленні світлових хвиль від прямолінійного напрямку при проходженні світла через малі отвори або біля малих перешкод. Дифракція світлових хвиль спостерігається, якщо розміри отворів або перешкод одного порядку з довжиною світлової хвилі, або якщо місце для спостереження дифракційної картини знаходиться на великій відстані від отвору або перешкоди.

Нехай паралельний пучок монохроматичного світла падає нормально на непрозорий екран, в якому є вузька щілина довжиною l і постійної ширини b , причому $b \ll l$ (рис. 1). Згідно з принципом Гюйгенса-Френеля точки щілини є джерелами вторинних хвиль. Фази цих хвиль будуть однакові, оскільки площина щілин збігається з фронтом хвилі, що падає.

Оскільки закон прямолінійного поширення світла порушується, у фокальній площині збиральної лінзи буде спостерігатися розподіл інтенсивності дифрагованих променів. У побічному фокусі F_φ цієї лінзи зберуться всі промені, кут дифракції яких дорівнює φ . Оптична різниця ходу крайніх променів AM і BN , що йдуть від щілини в цьому напрямі, а різниця фаз цих коливань:

$$\Delta = BC = b \sin \varphi; \quad \Delta \varphi_0 = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = \frac{2\pi \sin \varphi}{\lambda}. \quad (1)$$

Розглянемо дифракцію на дифракційній решітці.

Дифракційна решітка – це прозора пластинка, на якій за допомогою ділильної машини або фотографічним способом нанесені паралельно один одному штрихи і залишені вузькі непошкоджені смужки. Ті місця, де проведені штрихи, непрозорі і служать перешкодами для світлових хвиль.

Нехай ширина прозорої смужки a , а ширина штриха b . Величину $d=a+b$ прийнято називати періодом решітки або постійною решітки.

Знайдемо результуючу інтенсивність світлових хвиль в точці F_φ , в якій збираються промені від всіх щілин решітки, що падають на лінзу під кутом φ до її головної оптичної осі OF_0 . Скористаємося для цього векторною діаграмою додавання амплітуд:

$$\vec{A} = \sum_{i=1}^N \vec{A}_i, \quad (2)$$

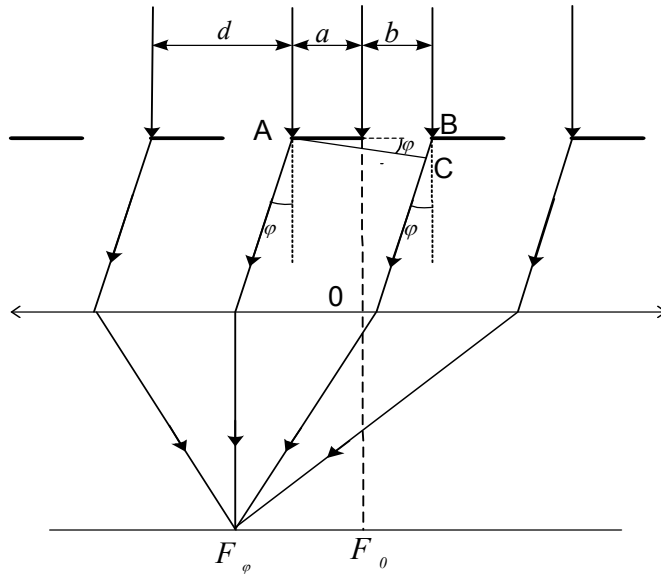
де N - число щілин у решітці,

A_i - вектор амплітуди коливань, що викликаються у даній точці дією i -ї щілини.

У випадку оптичної однорідності середовища в одному і тому напрямі всі щілини випромінюють світло однаково. Тому всі вектори A_i однакові за модулем $|\vec{A}_i| = A$. Зсув фаз $\Delta \varphi_0$ між векторами A визначається оптичною різницею ходу Δ від відповідних точок двох сусідніх щілин до точки F_φ .

Тому:

$$\Delta = BC = d \sin \varphi; \quad \Delta \varphi_0 = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = \frac{2\pi d \sin \varphi}{\lambda}. \quad (3)$$



Рисунк 2

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з технічним паспортом гоніометра Г5.
2. Перед щілиною коліматора встановити джерело світла.
3. Установити зорову трубу гоніометра так, щоб чітко було видно щілину коліматора.
4. Помістити в середині столика гоніометра дифракційну решітку перпендикулярно до осі коліматора.
5. Між джерелом світла і коліматором встановити жовтий світлофільтр. Установити, по-перше, чітке зображення щілини справа від нульового максимуму, а потім – зліва. Відмітити ці положення за допомогою шкали мікроскопа. Різниця цих відліків дає кут 2φ .
6. Аналогічні вимірювання виконати при встановленні зорової труби на максимуми 2-го, 3-го і т.д. порядків.
7. Результати вимірювань занести в таблицю:

Номер п/п	$d \pm \Delta d$	$\varphi \pm \Delta \varphi$	$\lambda \pm \Delta \lambda$	$\varepsilon, \%$

Обробка результатів експериментів та їх аналіз

1. Використовуючи дані вимірювань, за формулою $d \sin \varphi = \pm k \lambda$, визначити довжини хвиль жовтого, синього і зеленого світла.
2. Визначити похибки відповідних вимірювань.
3. Результати розрахунків занести в таблицю.

Лабораторна робота № 9

Вивчення зовнішнього фотоефекту

Мета роботи: вивчити закони фотоефекту; зняти вольт-амперні характеристики фотоелемента і визначити його інтегральну чутливість.

Прилади і матеріали: фотоелемент типу СЦВ-3, випрямляч, оптична лава, мікромметр, реостат, лампочка розжарення.

Теоретичні відомості

Одним з явищ, що спостерігається при взаємодії світла з речовиною, є фотоелектричний ефект (фотоефект), що полягає у вивільненні з речовини електронів під дією світла. Фотоефект був відкритий Г. Герцем в 1887 році.

Вперше детальні дослідження фотоефекту були проведені О. Г. Столетовим в 1887 році, який встановив, що дія світла зводиться до вивільнення від'ємних зарядів. Якщо вивчення законів теплового випромінювання привело до народження квантової теорії, уявлень про квантовий характер випромінювання енергії нагрітими тілами, то вивчення законів фотоефекту сприяло формуванню уявлень про квантовий характер поглинання світла. У залежності від умов, в які потрапляє вирваний електрон, розрізняють три типи фотоефекту. Якщо електрони не покидають меж тіла, то фотоефект називають внутрішнім. Якщо фотоелектрони вилітають з тіла у вакуум або газ, то фотоефект називають зовнішнім. У тому випадку, коли фотоелектрони покидають межі тіла, переходячи через поверхню розділу в інше тіло (напівпровідник), то явище називається фотоефектом в запірному шарі (вентильним фотоефектом).

О. Г. Столетов експериментально встановив такі закономірності зовнішнього фотоефекту.

1. Швидкість фотоелектронів є функцією частоти. Із збільшенням частоти швидкість електронів зростає. Частота ν_0 , починаючи з якої припиняється виліт фотоелектронів, називається червоною границею фотоефекту.

2. Швидкість фотоелектронів не залежить від інтенсивності випромінювання.

3. Фотострум насичення для даного фотокатода при постійній потужності випромінювання зростає зі збільшенням частоти.

Це пояснюється тим, що імовірність одночасного поглинання одним електроном двох фотонів мала. Тому кожний електрон, що вилетів, повністю поглинає енергію у одного фотона. Однак не кожний поглинутий фотон вивільняє електрон. Зі збільшенням частоти збільшується енергія фотонів, тому зростає число фотоелектронів. Перераховані закони фотоефекту були пояснені А. Ейнштейном у 1905 р.

Рівняння Ейнштейна для фотоефекту стверджує, що при фотоефекті енергія кванта світла, поглинутого електроном в металі, йде на надання електрону кінетичної енергії і на роботу A виходу електрона з металу:

$$h\nu = A + \frac{mV^2}{2}. \quad (1)$$

Рівняння (2) виражає закон збереження енергії при фотоефекті. Воно було підтверджене дослідями Міллікена, Йоффе, Лукирського і

Прилежаєва. На сьогоднішній день фотоефект широко застосовується у телебаченні, автоматиці, звуковому кіно, фотометрії та в багатьох інших областях науки і техніки.

У даній роботі вивчається вакуумний сурм'яно-цезієвий фотоелемент типу СЦВ-3. Він складається зі скляного балона, на внутрішній стінці якого нанесений тонкий шар сурми, а потім тонкий шар цезію. Фотокатодом служить сполука Cs_3Sb , що при цьому одержується. Такий катод має малу роботу виходу, і червона границя фотоефекту для даного фотоелемента знаходиться у видимій частині спектра. Другий електрод значно менших розмірів розташовується в центрі балона і служить анодом (рис. 1). У балоні створюється вакуум при тискові $\sim 10^{-7}$ мм рт. ст.

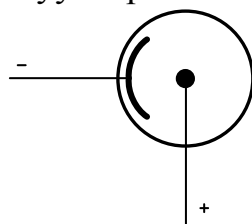


Рисунок 1

Якщо на фотокатод спрямувати промінь світла і створити між катодом і анодом різницю потенціалів, то виникне фотострум. Струм, що виникає, залежить від освітленості та напруги. Залежність фотоструму від напруги графічно зображують за допомогою кривої, яка називається вольт-амперною характеристикою фотоелемента.

Розрізняють вакуумні та газонаповнені фотоелементи. Останні відрізняються від вакуумних тим, що вони наповнені інертним газом. На рис. 2 показані вольт-амперні характеристики вакуумного (1) і газонаповненого (2) фотоелементів.

Для більшості вакуумних фотоелементів робоча напруга дорівнює приблизно 250 В. Вакуумні фотоелементи практично безінерційні.

Газонаповнені фотоелементи працюють при напругах до 90 В і мають велику інерційність.

При постійній напрузі величина фотоструму пропорційна потоку світлової енергії, що падає на фотокатод:

$$i = \gamma \Phi. \quad (2)$$

Величина інтегральної чутливості γ різних вакуумних фотоелементів має значення від декількох мікроампер на люмен до 100 мкА/лм. Потік світлової енергії:

$$\Phi = \frac{IS}{l^2}, \quad (3)$$

де I – сила світла джерела;

S - площа фотокатода;

l - відстань від джерела світла до фотокатода.

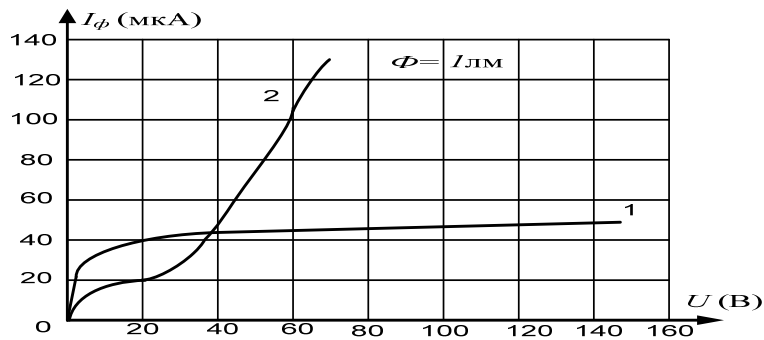


Рисунок 2

Схема для дослідження фотоелемента зображена на рис. 3.

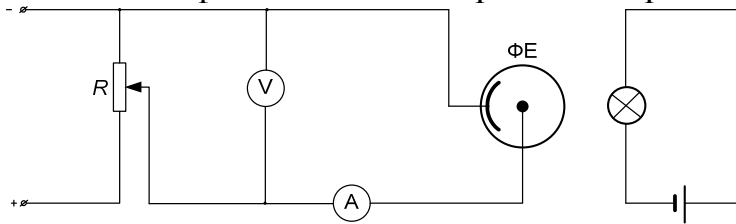


Рисунок 3

Порядок виконання роботи

1. Зняти вольт-амперні характеристики фотоелемента для трьох різних положень лампочки.
2. Дані експерименту занести в таблицю.
3. Побудувати вольт-амперні характеристики, використовуючи дані експерименту.

Лабораторна робота 10

Визначення втрат енергії α - частинок за довжиною вільного пробігу в повітрі

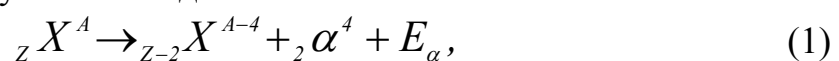
Мета роботи: за допомогою торцевого лічильника з досить тонким вхідним вікном виміряти залежність $N(x)=f(x)$ і розрахувати енергію α частинок.

Прилади і матеріали: перераховувальний прилад ПСО-2,4 в комплекті з блоком детектування α - випромінювання; радіоактивний препарат Pu^{239} .

Теоретичні відомості

Явище α -розпаду було відкрите в результаті вивчення природної радіоактивності хімічних елементів. Такі елементи розміщені в кінці періодичної системи Д. І. Менделєєва. Всього нараховується біля 40 природних і більше 100 штучних α -випромінювачів.

Рівняння α - розпаду має вигляд:



де ${}_Z X^A$ – материнське ядро;

${}_{Z-2} X^{A-4}$ – дочірнє ядро;

${}_2 \alpha^4$ – α - частинка (ядро атома гелію);

E_α – енергія, яка звільняється при α -розпаді (кінетична енергія α -частинки).

Внаслідок випромінювання α -частинок заряд ядра зменшується на дві одиниці, а масове число – на чотири одиниці.

Енергія $E_\alpha > 0$, тому α -розпад можливий в тому випадку, коли маса материнського ядра більша маси дочірнього ядра і атома гелію.

Енергія α -частинок для різних α -випромінювачів змінюється від 4 до 9 МеВ. Ця енергія значно менша тієї енергії, яку α -частинки повинні були одержати після розпаду за рахунок прискорення в електричному полі ядра. Тобто α -частинки після виходу з ядра повинні прискорюватись до енергії не менше ніж 30 МеВ. Однак експериментально спостерігаються лише α -частинки з енергіями від 4 до 9 МеВ.

Для визначення енергії α -частинок за довжиною вільного пробігу в повітрі слід розглянути механізм взаємодії α -випромінювання з речовиною.

Заряджена частинка, рухаючись в речовині, встигає пролетіти деяку відстань перед тим, як втратить всю свою кінетичну енергію. Шлях зарядженої частинки в речовині до повної її зупинки називають лінійним пробігом. Лінійний пробіг визначається питомими втратами енергії взаємодії з ядрами атомів.

Для визначення довжини вільного пробігу α -частинок в повітрі слід побудувати залежність $N(x)$ числа частинок, які реєструються блоком детектування на різних відстанях від α -випромінювача, від відстані X .

Графік цієї залежності показаний на рис. 1.

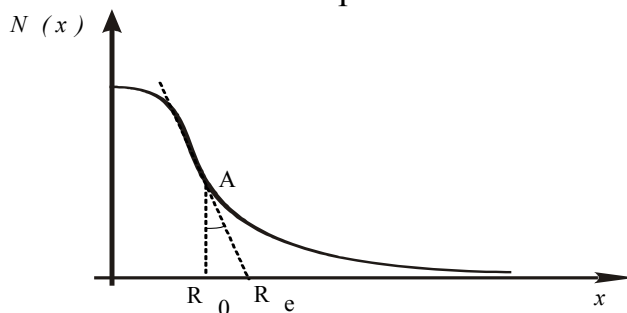


Рисунок 1

Як видно з рис. 1, число зареєстрованих на різних відстанях x α -частинок спочатку трохи зростає, а потім різко спадає. Це пояснюється тим, що іонізаційні властивості α -частинок при зменшенні їх швидкості різко зростають.

Точка перетину A характеризує середній пробіг R_0 α -частинок у повітрі.

Дотична, яка проходить через точку A , екстраполює найбільш прямолінійну частину цієї кривої з віссю x , дає значення екстрапольованого пробігу R_e . Різниця $R_e - R_0 = \delta$ приймається, як правило, за міру розкиду пробігів α -частинок.

Для α -частинок з енергією $E=5 \text{ MeV}$ - $\delta/R_0 = 0,01$. З ростом енергії α -частинок значення відношення δ/R_0 зменшується. Оскільки величина δ/R_0 досить мала, то пробіг частинок у повітрі однозначно визначається їх енергією.

У повітрі при нормальних умовах зв'язок між середнім пробігом R_0 (см) і втратами енергії α -частинок E (MeV) виражається формулою:

$$R_0 = 0,318 E^{1,5}. \quad (2)$$

Ця формула добре збігається з експериментальними даними для α -частинок, енергія яких перебуває в межах $4 \leq E \leq 9 \text{ MeV}$.

Порядок виконання роботи

У лабораторній роботі використовується блок детектування, реєструвальний пристрій якого виконаний на основі люмінофора ZnS , активованого атомами срібла. Світлові імпульси вловлюються фотопомножувачем і багаторазово підсилюють створену ними електронну емісію. Перераховувальний прилад ПСО-2,4 дає можливість зареєструвати практично кожний імпульс на цифровому табло.

1. Ознайомитись з лабораторною установкою за інструкцією або з допомогою лаборанта.

Мікрометричний гвинт, на торці якого укріплено радіоактивний препарат Pu^{239} , встановити на нуль. При цьому препарат буде знаходитись на мінімальній відстані від флуоресціюючого екрана.

2. Провести вимірювання числа $N(x)$ α -частинок через кожен 1мм відстані препарату від поверхні лічильника (два повних оберти мікрогвинта). Час вимірювання $t = 100 \text{ с}$.

Результати вимірювань занести до таблиці.

x (см)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
N (x)										

3. Побудувати графік залежності кількості зареєстрованих α -частинок від відстані X між препаратом і лічильником.

4. Визначити величину середнього пробігу R_0 α -частинок згідно з описом в теоретичних відомостях і рис. 1.

5. Користуючись формулою (2) теоретичних відомостей, знайти втрати енергії α -частинками на іонізацію молекул повітря.

Контрольні запитання

1. Записати правило зміщення для α -розпаду і дати його характеристики.

2. Чому енергія випромінюваних α -частинок порівняно невелика?

3. Як взаємодіють α -частинки з молекулами речовини?

4. Як знаходять довжину вільного пробігу α -частинок у повітрі та втрати енергії на іонізацію молекул повітря?

Додаток А

1 Густина речовини

Тверді тіла, $\times 10^3 \text{ кг/м}^3$

Алюміній	2,7	Свинець.....	11,3
Лід	0,9	Срібло.....	10,5
Мідь.....	8,9	Сталь.....	7,8
Олово.....	7,3	Вісмут.....	9,8
Латунь.....	8,55	Вольфрам.....	19,3
Мідь.....	8,93	Залізо.....	7,87
Срібло.....	10,5	Кам'яна сіль.....	2,2

Рідини $\times 10^3 \text{ кг/м}^3$

Вода.....	1,0	Ртуть.....	13,6
Гас.....	0,80	Спирт.....	0,79
Нафта.....	0,80	Гліцерин.....	1,26
Масло оливкове.....	0,9	Ефір.....	0,7

Гази, кг/м^3

(за нормальних умов)

Азот.....	1,25	Кисень.....	1,43
Водень.....	0,09	Повітря.....	1,29
		Аргон.....	1,78

2 Границя міцності на розтяг $\sigma_{\text{мц}}$ і модуль пружності Е

Речовина	$\sigma_{\text{мц}}$, МПа	Е, ГПа
Алюміній	100	70
Мідь	400	120
Олово	20	50
Свинець	15	15
Срібло	140	80
Сталь	500	200

3 Теплові властивості речовини

Тверді тіла

Речовина	Питома Теплоємність кДж/(кг·К)	Температура Плавлення °С	Питома теплота Плавлення кДж/кг
Алюміній	0,88	660	380
Лід	2,1	0	330
Мідь	0,38	1083	180
Олово	0,23	232	59
Свинець	0,13	327	25
Срібло	0,23	960	87
Сталь	0,46	1400	82

Рідини

Речовина	Питома теплоємність, кДж/(кг К)	Температура Кипіння, °С	Питома теплота пароутворення, МДж/кг
Вода	4,2	100	2,3
Гас	2,1	-	-
Ртуть	0,12	357	0,29
Спирт	2,4	78	0,85

Гази

Речовина	Питома теплоємність, кДж/(кг К)	Температура конденсації, °С
Азот	1,0	-196
Водень	14	-253
Кисень	0,92	-183
Повітря	1,0	-

4 Коефіцієнт поверхневого натягу рідини, мН/м

(при 20° С)

Вода.....	73	Ртуть.....	510
Гас.....	24	Спирт.....	22
Нафта.....	30		

5 Питома теплота згоряння палива, МДж/кг

Бензин.....	46	Нафта.....	43
Гас.....	46	Порох.....	3,8
Дерево.....	10	Спирт.....	29
Дизельне паливо.....	42	Умовне паливо.....	29
Кам'яне вугілля.....	29		

6 Залежність тиску p та густини ρ насиченої водяної пари від температури t

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$	$\rho, \text{г/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$	$\rho, \text{г/м}^3$
-5	0,40	3,2	10	1,23	9,4
0	0,61	4,8	11	1,33	10,0
1	0,65	5,2	12	1,40	10,7
2	0,71	5,6	13	1,49	11,4
3	0,76	6,0	14	1,60	12,1
4	0,81	6,4	15	1,71	12,8
5	0,88	6,8	16	1,81	13,6
6	0,93	7,3	17	1,93	14,5
7	1,0	7,8	18	2,07	15,4
8	1,06	8,3	19	2,20	16,3
9	1,149	8,8	20	2,33	17,3

7 Психрометрична таблиця

Покази сухого термо- метра °C	Різниця показів сухого і вологого термометрів, °C										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Відносна вологість, %										
0	100	81	63	45	28	11	-	-	-	-	-
2	100	84	68	51	35	20	-	-	-	-	-
4	100	85	70	56	42	28	14	-	-	-	-
6	100	86	73	60	47	35	23	10	-	-	-
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7	-	-
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	5	-
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	-
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
20	100	91	83	74	63	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

8 Діелектричні проникності речовин

Вода.....	81	Парафін.....	2,1
Гас.....	2,1	Слюда.....	6
Олія.....	2,5	Скло.....	7

9 Питомий опір ρ (при 20°C) і температурний коефіцієнт опору α металів та сплавів

Речовина	ρ $\times 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{ м},$	$\alpha, \text{ K}^{-1}$	Речовина	ρ $\times 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{ м},$	$\alpha, \text{ K}^{-1}$
Алюміній	2,8	0,0042	Ніхром	110	0,0001
Вольфрам	5,5	0,0048	Свинець	21	0,0037
Латунь	7,1	0,001	Срібло	1,6	0,004
Мідь	1,7	0,0043	Сталь	12	0,006
Нікелін	42	0,0001			

10 Електрохімічні еквіваленти, мг/Кл або $\times 10^{-6}$ кг/Кл

Алюміній (Al^{3+}).....	0,093	Нікель (Ni^{2+})	0,30
Водень (H^+).....	0,0104	Срібло (Ag^+).....	1,12
Кисень (O^{2-}).....	0,083	Хром (Cr^{3+}).....	0,18
Мідь (Cu^{2+}).....	0,33	Цинк (Zn^{2+}).....	0,34

11 Робота виходу електронів, eВ

Вольфрам.....	4,5	Платина.....	5,3
Калій.....	2,2	Срібло.....	4,3
Літій.....	2,4	Цинк.....	4,2
Оксид барію.....	1,0		

12 Показник заломлення

(середній для видимого проміння)

Алмаз.....	2,4	Сірковуглець.....	1,63
Вода.....	1,3	Скло.....	1,6
Повітря.....	1,00029	Спирт етиловий.....	1,36

13 Відносна атомна маса деяких ізотопів, а. о. м.

Ізотоп	Маса нейтрального атома	Ізотоп	Маса нейтрального атома
${}^1_1\text{H}$ Водень	1,00783	${}^8_4\text{Be}$ Берилій	8,00531
${}^2_1\text{H}$ Дейтерій	2,01410	${}^{10}_5\text{B}$ Бор	10,01294
${}^3_1\text{H}$ Тритій	3,01605	${}^{12}_6\text{C}$ Вуглець	12,00000
${}^3_2\text{He}$ Гелій	3,01602	${}^{14}_7\text{N}$ Азот	14,00307
${}^4_2\text{He}$ Гелій	4,00260	${}^{16}_8\text{O}$ Кисень	15,99491
${}^6_3\text{Li}$ Літій	6,01513	${}^{17}_8\text{O}$ Кисень	16,99913
${}^7_3\text{Li}$ Літій	7,01601	${}^{27}_{13}\text{Al}$ Алюміній	26,98146

Щоб визначити масу ядра, треба відняти сумарну масу електронів. (Тут мається на увазі, що маса ядра і електронів виражається в а. о. м.).

14 Префікси для утворення десяткових кратних і частинних одиниць

Кратні			Частинні		
префікс	позначення	множник	префікс	позначення	множник
екса	Е	10^{18}	атто	а	10^{-18}
пета	П	10^{15}	фемто	ф	10^{-15}
тера	Т	10^{12}	піко	п	10^{-12}
гіга	Г	10^9	нано	н	10^{-9}
мега	М	10^6	мікро	мк	10^{-6}
кіло	К	10^3	мілі	м	10^{-3}
гекто	Г	10^2	санти	с	10^{-2}
дека	да	10^1	деци	д	10^{-1}

15 Таблиці значень синусів і тангенсів для кутів 0 – 90°

Гра- дуси	Синуси	Тангенси	Гра- дуси	Синуси	Тангенси	Гра- дуси	Синуси	Тангенси
0	0,0000	0,0000	31	0,5150	0,6009	61	0,8746	1,804
1	0,0175	0,0175	32	0,5299	0,9249	62	0,8829	1,881
2	0,0349	0,0349	33	0,5446	0,6494	63	0,8910	1,963
3	0,0523	0,0524	34	0,5592	0,6745	64	0,8988	2,050
4	0,0698	0,0699	35	0,5736	0,7002	65	0,9063	2,145
5	0,0872	0,0875	36	0,5878	0,7265	66	0,9135	2,246
6	0,1045	0,1051	37	0,6018	0,7536	67	0,9205	2,356
7	0,1219	0,1228	38	0,6157	0,7813	68	0,9272	2,475
8	0,1392	0,1405	39	0,6293	0,8098	69	0,9336	2,605
9	0,1564	0,1584	40	0,6428	0,8391	70	0,9397	2,747
10	0,1736	0,1763	41	0,6561	0,8693	71	0,9455	2,904
11	0,1908	0,1944	42	0,6691	0,9004	72	0,9511	3,078
12	0,2079	0,2126	43	0,6820	0,9325	73	0,9563	3,271
13	0,2250	0,2309	44	0,6947	0,9657	74	0,9613	3,487
14	0,2419	0,2493	45	0,7071	1,0000	75	0,9659	3,732
15	0,2588	0,2679	46	0,7193	1,036	76	0,9703	4,011
16	0,2756	0,2867	47	0,7314	1,072	77	0,9744	4,331
17	0,2924	0,3057	48	0,7431	1,111	78	0,9781	4,705
18	0,3090	0,3249	49	0,7547	1,150	79	0,9816	5,145
19	0,3256	0,3443	50	0,7660	1,192	80	0,9848	5,671
20	0,3420	0,3640	51	0,7771	1,235	81	0,9877	6,314
21	0,3584	0,3839	52	0,7880	1,280	82	0,9903	7,115
22	0,3746	0,4040	53	0,7986	1,327	83	0,9925	8,114
23	0,3907	0,4245	54	0,8090	1,376	84	0,9945	9,514
24	0,4067	0,4452	55	0,8192	1,428	85	0,9962	11,43
25	0,4226	0,4663	56	0,8290	1,483	86	0,9976	14,30
26	0,4384	0,4877	57	0,8387	1,540	87	0,9986	19,08
27	0,4540	0,5095	58	0,8480	1,600	88	0,9994	28,64
28	0,4695	0,5317	59	0,8572	1,664	89	0,9998	57,29
29	0,4848	0,5543	60	0,8660	1,732	90	1,0000	∞
30	0,5000	0,5774						

Словник технічних термінів

А

адіабата	adiabat
адіабатний	adiabatic
аеродинаміка	aerodynamics
акустика	acoustics
акумулятор	accumulator
акцептор	acceptor
альфа-промені	alpha-rays
альфа-розпад	alphadisintegration
альфа-частинка	alpha-particle
ампер-година	ampere-hour
аніони	anions
анод	anode
антенна	antenna
антинейтрино	antineutrino
ареометр	areometer
атмосфера	atmosphere
атом	atom
атомне ядро	atomic nucleus
атомні спектри	atomic spectrums

Б

барометр	barometer
бета-активність	beta-activity
бета-промені	beta-rays
бета-розпад	beta-disintegration
бета-частинка	beta-particle
блискавка	lightning
броунівський	Brownian
будова	structure

В

вага	weight
важіль	lever
взаємодія	co-operation
вакуум	vacuum
валентність	valency
ватметр	wattmeter
вектор	vector
відбивач	reflector
віддаль, відстань	distance, distance

відносність	relativity
відцентрова сила	centrifugal force
відштовхування	pushing away
вільне падіння	free falling
вимірювання	measuring
випаровування	evaporation
випромінювання	radiation
високо частотний	high-frequency
вихрові струми	vortical currents
вмикати	engage turn on
вологість	humidity
всесвіт	universe
вузол	knot

Г

газоподібний	gaseous
гальванічний	galvanic
гальмувати	to brake
гамма-активність	gamma-activity
гамма-промені	gamma-rays
гармонічний	harmonic
генерування	generating
гистерезіс	gisteresis
голографія	holography
гравітаційний	gravity
гучномовець	loud speaker
густина	closeness
гучність	volume

Д

двигун	engine
джерело світла	source of light
дефект мас	masses defect
джерело	source
дзеркало	mirror
дірочна дифузія	hole diffusion
динаміка	dynamics
динамометр	dynamometer
дисперсія	dispersion
дифракція	diffraction
дифузія	diffusion
діелектрики	dielectrics
довжина хвиль	length of waves
домени	domains

донори	donors	збудження	excitation
доцентрова сила	centripetal force	звук	sound
Е		з'єднання	connection
Еквіпотенціальний	equipotencial	зір	sight
Електризація	electrization	змінний струм	alternating current
електрична стала	electric constant	зміщення	displacement
електричне поле	electric field	змочування	moistening
електричний заряд	electric charge	знижувальний зображення	step-down image
електричний опір	electric resistance	зсув	shear
електричний струм	electric current	І	
електрична ємність	electric capacity	ідеальний газ	ideal gas
електродвигун	electric motor	ізобарний	isobar
електроліз	electrolysis	ізолятор	insulator
електроліти	electrolytes	ізотерма	isotherm
електрон	electron	ізотоп	isotope
електромагнетизм	electromagnetism	ізохора	izokhora
електропровідність	conductivity	ізохорний	isochoric
електростатичний	electrostatic	імпульс	impulse
електрохімічний	electrochemical	індуктивність	inductance
емісія	emission	індукційний	inductive
e.p.c.	e.m.f.	індукція	induction
Є		інертність	sluggishness
ємність, місткість	capacity	інерційний	inertial
З		інерція	inertia
заборона	prohibition	інтерференція	interference
загальмувати	to put on the brakes	інфразвук	infra-sound
заломлення світла	refraction of light	іонізація	ionization
запис	record	іони	ions
запобіжник	safety device	К	
заряд	charge	Карно цикл	Karno's cycle
замикання	shorting	капіляр	capillary
затухання	fading	катод	cathode
збереження	maintainance	катодний	cathodic
		квант світла	quantum of light
		квант енергії	energy quantum
		квантування	quantum
		кисень	oxygen
		кіловат-година	kilowatt-hour
		кількість теплоти	warmth amount
		кілогерц	kilocycle,
			kilohertz
		кінематика	kinematics

кінетична енергія	kinetic energy	молекула	molecule
кипіння	boiling	молекулярна маса	molecular mass
клема	terminal	момент сили	moment of force
когерентність	coherentness	монохроматичний	monochromatic
коефіцієнт	coefficient	Н	
коливання	oscillation	навантаження	load
коливальний	oscillatory	нагрівач,	heater
конвекція	convection	нагрівник	
конденсатор	condenser	нагрівальний	heating
комірка	barn	надтекучість	superfluidity
катушка	spool	намагніченість	magnetization
кристал	crystal	намагнічування	magnetization
кристалізація	crystallization	напівпровідник	semiconductor
крихкість	fragility	напруга	tension, voltage
кришталік	lens of the eye	насичення	satiation
кулонівський	coulomb	натяг	pull
кутова	angulator	невагомість	weightlessness
швидкість		нейтрон	neutron
Л		необоротність	irreversibility
лазер	laser	неперервність	continuity
лінза	lens	нескінченність	endlessness
літр	litre	нестійкість	instability
лічильник	meter	носій	bearer
Лоренца сила	Lorenс's force	О	
люмен	lumen	оберт	turn, revolution
люмінесценція	luminescence	обкладка	facing
люкс	lux	оборотність	reversibility
лужний	alkaline	оборотний процес	circulating process
М		обертання	rotation, circulation
магнетик	magnetic	обертальний	rotatory
магнетний	magnetic	об'єктив	lens
магнетизм	magnetism	одночасність	simultaneity
магнетна	magnetic	однорідність	homogeneity
індукція	induction	око	eye
магнетне поле	magnetic field	окуляр	eyepiece
магнетна стала	magnetic constant	окуляри	glasses
магнетний потік	magnetic stream	опір	resistance
маса	mass	опромінювати	to expose to rays
матеріальна	material point	опромінення	irradiation
точка		оптика	optics
метали	metals	оптична вісь	optical axis
механіка	mechanics		
мікросвіт	mikrocasm		

оптична	сила	optical lens force	реакція	reaction
лінзи			резонанс	resonance
освітленість		luminosity	релятивістський	relativism
осердя		core	речовина	matter, substance
осцилограф		oscillograph	решітка, ґратка	grate
П			рівновага	equilibrium,
падіння		falling		balance
пальне		fuel	рівнодійна	resultant
пара		pair	рівномірний	even, equal
парамагнетний		paramagnetic	рівноприскоре-	equal
передавач		transmitter	ний	accelerated
перемикач		switch	рідина	liquid
переміщення		moving	робота	work
період коливань		vibrations period	розжарення	incandescence
піврозпад		half-decay	розкладання сил	forces
підсилювач		booster		decomposition
плавлення		melting	розмірність	dimension
плазма		plasma	розряд	digit
пластичність		plasticity	розсіяння	dispersion
плівка		tape	розтяг	stretching,
повітря		air		straining
позитивний		positive	рух	motion
позитрон		positron	С	
поляризація		polarization	самоіндукція	self-induction
полярність		polarity	світло	light
поступальний		forward motion	світловий потік	light stream
рух			світловий тиск	light pressure
потік		stream	світлофільтр	colour filter
потенціальна		potential force	сітка, мережа	network
сила			сила світла	light force
потужність		power	сила звуку	sound force
природний		natural	сила струму	current strength
прискорення		acceleration	сила тяжіння	gravity
прискорювач		accelerating	силові лінії	force lines
провідник		explorer	система відліку	reference frame
проміжок, зазор		interval, gap	скаляр	scalar
промінь		ray	смуга	stripe
проникність		permeability	спектр	spectrum
протон		proton	сповільнення	deceleration
пружність		elasticity,	спокій	calmness
		resiliency	спонтанність	spontaneity
Р			сприйнятливість	receptivity
радіоактивність		radio-activity	стала розпаду	disintegration
радіохвилі		radio waves		constant

стан	state	фотоефект	photo-effect
статика	statics	фотопровідність	photoconductivity
стиск, стискання	pressing, compression	фотоопір	photo-resistance
стисливість	compressibility	фотоелектричний	photo-electric
стійкість	resistance, stability	фотоелемент	photo-cell
Т		фронт хвилі	wave-front
тяжіння	gravitation, gravity	Х	
танення	melting	хаотичний	chaotic
твердість	hardness	хвиля	wave
терези	scales	холодильник	refrigerator
текучість	fluidity	Ц	
температура	temperature	центр ваги	weight center
теплова машина	thermal/heat machine	центр маси	mass center
тепловий рух	thermomotion	цикл	cycle
теплоємність	heat capacity	циклічна частота	cyclic frequency
теплообмін	heat exchange	Ч	
теплопровідність	heat-conductivity	час	time
теплота	heat	частота коливань	vibrations frequency
термодинаміка	thermodynamics	частота обертання	rotation frequency
термонядерний	thermonuclear	чутливість	sensitiveness
тертя	rubbing, friction	Ш	
тиск	pressure	шар	layer, stratum
траєкторія	trajectory	швидкість	speed
транзистор	transistor	штучний	artificial
трансформатор	transformer	шунтування	shunt
тріод	triode	Я	
У		явище	phenomenon
удар	blow	ядерна енергія	nuclear energy
ультразвук	ultrasound	ядерний реактор	nuclear reactor
ультрафіолетовий	ultraviolet	ядерні реакції	nuclear reactions
Ф		ядерне паливо	nuclear fuel
фаза	phase	ядро атома	atomic nucleus
ферромагнетизм	feromagnetizm	якір	anchor
фізична стала	physical constant	яскравість	brightness
фокусна відстань	focal distance		
фокусування	focusing		

Література

1. Лопатинський І. Є., Зачек І. Р., Ільчук Г. А., Романишин Б. М. Фізика. Підручник. – Львів: Авіша, 2005. – 394 с.
2. Римкевич А. П. Збірник задач з фізики. – Харків: Олант, 2007. – 224 с.
Дудінова О. В., Демченко К. Е. Фізика за всією шкільною програмою.- Харків: Вежа. ФОН Співак В. А., 2009. -380 с.
3. Садовий А. І., Лего Ю. Г. Основи фізики з задачами і прикладами їх розв'язування. – Київ: Кондор, 2003. – 384 с.
4. Кравцов О. В., Гомонай О. В. Фізика. Навчальний посібник для слухачів УДП НТУУ. – Київ: КПІ, 2006. -363 с.
5. Кравцов О.В., Гомонай О. В. 100 задач підвищеної складності з фізики. – Київ: КПІ, 2006. – 87 с.
6. Рыбалка А. И., Кибец И. Н., Шкляревский И. О. 2002 задачи по физике (для выпускников и абитуриентов).- Харьков: Фолио, 2003. – 783 с.
7. Гольдфарб Н. І. Збірник запитань і задач з фізики. Посібник для підготовчих відділень. – Київ: Вища школа, 1986. – 310 с.
8. Гельфгат И. М., Гейнштейн Л. Е., Кирик Л. А., 1001 задача по физике с решениями. – Харьков – Москва: Центр «Инновации в науке и технике, образовании», 1995. – 592 с.
9. Кабардін О. Ф., Кабардіна С. І., Орлов В. О. Завдання для контролю знань учнів з фізики в середній школі. – Київ: Вища школа, 1986.– 160 с.
10. Кузмичев В. Е. Законы и формулы физики. Справочник.- Киев: Наукова думка, 1989. – 861 с.

Навчальне видання

**Лисий Михайло Вікторович
Поспєлов Ігор Миколайович**

Курс загальної фізики для слухачів-іноземців підготовчого відділення

Навчальний посібник

Редактор В. Дружиніна
Коректор З. Поліщук

Оригінал-макет підготовлено М. Лисим

Підписано до друку
Формат 29,7×42 ¼ . Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк ізографічний. Ум. друк. арк.
Наклад прим. Зам. №

Вінницький національний технічний університет,
науково-методичний відділ ВНТУ.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, к. № 2201.
Тел. (0432) 59-87-36.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.