

А.Д.Слободяник, П.М.Зузяк

**КУРС ФІЗИКИ ДЛЯ ПІДГОТОВЧОГО ВІДДІЛЕННЯ
ІНОЗЕМНИХ СТУДЕНТІВ**

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

А.Д.Слободяник, П.М.Зузяк

**КУРС ФІЗИКИ ДЛЯ ПІДГОТОВЧОГО ВІДДІЛЕННЯ
ІНОЗЕМНИХ СТУДЕНТІВ**

Затверджено Вченою радою Вінницького національного технічного університету як навчальний посібник для студентів-іноземців підготовчого відділення. Протокол № 12 від 29 червня 2006 р.

Вінниця ВНТУ 2007

**УДК 53(03)
С 23**

Рецензенти:

В.П.Кожем'яко, доктор технічних наук, професор

І.О. Сивак, доктор технічних наук, професор

В.В.Атаманюк, кандидат фізико-математичних наук, доцент

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

Слободяник А.Д., Зузяк П.М.

С 23 Курс фізики для підготовчого відділення іноземних студентів.

Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2007.- 111 с.

Навчальний посібник розрахований на студентів-іноземців підготовчого відділення, які вивчають фізику та мають намір продовжити навчання в технічному вузі. Посібник містить основні фізичні закони, поняття з усіх розділів фізики.

Матеріал посібника спрямований на максимальне засвоєння фізичних основ, понять та законів українською мовою.

УДК 53(03)

© А.Д.Слободяник, П.М.Зузяк, 2007

ЗМІСТ

Розділ I. МЕХАНІКА

§ 1. Загальні поняття механіки.....	4
§ 2. Прямолінійний рух.....	6
§ 3. Криволінійний рух.....	8
§ 4. Закони Ньютона.....	13
§ 5. Сили в природі.....	15
§ 6. Елементи статички.....	18
§ 7. Робота, потужність, енергія.....	18
§ 8. Закон збереження імпульсу.....	20
§ 9. Динаміка обертального руху твердого тіла.....	21
§ 10. Механіка рідин і газів.....	23

Розділ II. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА

§ 1. Основи молекулярно-кінетичної теорії.....	27
§ 2. Термодинаміка.....	28
§ 3. Молекулярно-кінетична теорія ідеального газу.....	36
§ 4. Поверхневий натяг і деякі властивості рідин.....	38

Розділ III. ЕЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

§ 1. Електростатика.....	41
§ 2. Закони постійного струму.....	47
§ 4. Електричний струм у рідинах.....	50
§ 4. Електричний струм у газах.....	51
§ 5. Електричний струм у вакуумі.....	54

Розділ IV. ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

§ 1. Магнітне поле струму.....	57
§ 2. Електромагнітна індукція.....	63

Розділ V. КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ

§ 1. Механічні коливання.....	66
§ 2. Електромагнітні коливання.....	70
§ 3. Механічні хвилі. Звук.....	72
§ 5. Електромагнітні хвилі.....	76

Розділ VI. ОПТИКА

§ 1. Природа і властивості світла.....	79
§ 2. Фотометрія.....	79
§ 3. Геометрична оптика.....	80
§ 4. Світлові хвилі.....	86
§ 5. Дія світла на речовини.....	89

Розділ VII. ФІЗИКА АТОМА І АТОМНОГО ЯДРА

§ 1. Фізика атома.....	91
§ 2. Фізика атомного ядра.....	92
Основні фізичні сталі.....	99
Словник термінів.....	101
Література.....	110

Розділ I

МЕХАНІКА

§ 1. Загальні поняття механіки

Механіка це розділ фізики, в якому вивчається механічний рух.

Механічним рухом називають зміну положення тіла (або його частин) з часом відносно інших тіл. Положення тіла в просторі можна визначити тільки відносно будь-якого іншого тіла або інших тіл. Тому рух тіл завжди *відносний*. Тіло, відносно якого розглядається рух інших тіл, називають *тілом відліку*.

Систему координат, пов'язану з тілом відліку, і вибраний спосіб вимірювання часу називають *системою відліку*. Здебільшого користуються прямокутною системою координат. Простіше математично описати рух матеріальної точки, ніж протяжного тіла. Тіло, розмірами якого в умові даної задачі можна знехтувати, називається *матеріальною точкою*. Те саме тіло в одному випадку можна розглядати як матеріальну точку, в іншому — як протяжне тіло. Так, наприклад, під час обчислення траєкторії руху Землі навколо Сонця Землю можна вважати матеріальною точкою, а при вивченні руху тіл по її поверхні Землю треба розглядати як протяжне тіло.

Лінія, яку описує матеріальна точка під час свого руху, називається *траєкторією*. За траєкторією рухи поділяються на прямолінійні та криволінійні.

Описати рух тіла означає описати рух усіх його точок. Найпростіше це зробити для абсолютно твердого тіла. Будь-який рух твердого тіла можна розглядати як сукупність поступального і обертального рухів.

Поступальний — це такий рух, під час якого всі точки тіла описують однакові траєкторії; їхні шляхи і переміщення, швидкості і прискорення однакові. Щоб описати поступальний рух твердого тіла, достатньо описати рух однієї будь-якої його точки. Наближено поступальним можна вважати рух поршня відносно циліндра в двигуні внутрішнього згоряння, рух вагона відносно Землі на прямолінійній ділянці колії.

Обертальним називають такий рух відносно нерухомої осі, коли всі точки тіла описують кола, центри яких лежать на одній прямій — осі обертання. Кутові швидкості і кутові прискорення всіх точок тіла однакові, радіуси всіх точок описують однакові кути. Точки, які знаходяться на різних відстанях від осі обертання, проходять різні шляхи, мають різні лінійні швидкості та прискорення (рис. 1).

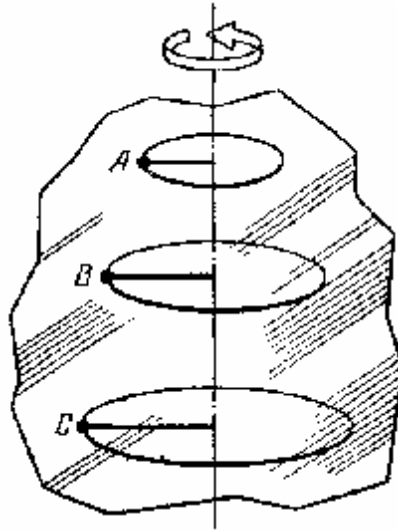


Рис.1

Положення матеріальної точки в даний момент часу відносно прямокутної системи координат визначається координатами (x, y, z) . Рівняння залежності координат від часу $x = f_1(t), y = f_2(t), z = f_3(t)$ називають *рівняннями руху*. Виключивши із цих рівнянь час, знайдемо *рівняння траєкторії* руху матеріальної точки.

Замість трьох рівнянь руху матеріальної точки можна задати одне векторне рівняння: $\dot{\mathbf{r}} = \dot{\mathbf{r}}(t)$, де $\dot{\mathbf{r}}$ — радіус-вектор (напрявлений відрізок, проведений від початку координат до даної матеріальної точки).

Положення матеріальної точки під час руху по колу визначають кутом повороту рухомого радіуса: $j = f(t)$.

Довжина траєкторії, яку описує матеріальна точка під час руху, називається *шляхом*. Шлях — це скалярна величина. Напрявлений відрізок, що з'єднує початкове і кінцеве положення тіла, називають *переміщенням* $\dot{\mathbf{s}}$. Переміщення $\dot{\mathbf{s}}$ — величина векторна (рис.2).

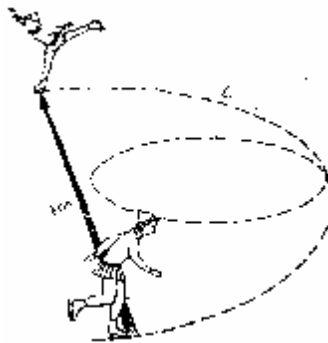


Рис.2

Основна задача механіки (пряма задача) така: знайти положення рухомого тіла (координати і швидкість) у будь-який момент часу за початковим його положенням (координатами і швидкістю) і силами, що діють на тіло в кожний момент часу.

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

Механіка охоплює *кінематику*, в якій описано різні види механічних рухів, але не з'ясовано причини зміни стану руху; *динаміку*, яка вивчає причини зміни руху тіла, тобто виникнення прискорення, і *статику*, яка розглядає умови відносного спокою тіл.

§ 2. Прямолінійний рух

Прямолінійний рівномірний рух (ПРР). Так називається рух, при якому тіло за будь-які послідовні рівні інтервали часу здійснює однакові переміщення.

Рух, наприклад, автомобіля на прямолінійній ділянці траєкторії, якщо його швидкість стала, можна вважати прямолінійним рівномірним.

Швидкістю $\overset{\mathbf{r}}{V}$ ПРР тіла називають величину, що вимірюється відношенням переміщення $\overset{\mathbf{r}}{s}$ до інтервалу часу t , протягом якого відбулося це переміщення:

$$\overset{\mathbf{r}}{V} = \frac{\overset{\mathbf{r}}{s}}{t} \quad (1.1)$$

Одиниця швидкості в СІ: $1 \frac{m}{c}$

Швидкість у ПРР величина стала за модулем і напрямом, який збігається з напрямом переміщення. Переміщення обчислюється за формулою:

$$\overset{\mathbf{r}}{s} = \overset{\mathbf{r}}{V} \times t \quad (1.2)$$

Проекцію переміщення і координату тіла за будь-який інтервал часу t обчислюють за формулами:

$$s_x = V_x t \quad (1.3)$$

$$x = x_0 + V_x t \quad (1.4)$$

де x_0 — координата тіла в початковому положенні.

У прямолінійному рівномірному русі модуль переміщення чисельно дорівнює шляху.

Прямолінійний рівнозмінний рух. У реальних рухах швидкість тіла з часом змінюється. Такі рухи називають *нерівномірними* або *прискореними*, їх характеризують *середньою швидкістю*

$$\overset{\mathbf{r}}{V}_c = \frac{\overset{\mathbf{r}}{s}}{t}, \quad (1.5)$$

$$V_c = \frac{l}{t}, \quad (1.6)$$

де $\overset{\mathbf{r}}{V}_c$ — векторна величина;

V_c — скалярна величина;

$\overset{\mathbf{r}}{s}$ — переміщення;

l — шлях тіла за час t .

За допомогою середньої швидкості не можна визначити положення тіла в будь-який момент часу, навіть якщо відома траєкторія руху. Вона характеризує рух за даний інтервал часу або на даній ділянці траєкторії.

Швидкість у будь-який момент часу або в будь-якій точці траєкторії називається *миттєвою швидкістю*, її визначають за формулою:

$$\overset{\mathbf{r}}{V} = \lim_{Dt \rightarrow 0} \frac{D\overset{\mathbf{r}}{s}}{Dt} = \frac{d\overset{\mathbf{r}}{s}}{dt}, \quad (1.7)$$

де $D\overset{\mathbf{r}}{s}$ і $d\overset{\mathbf{r}}{s}$ — нескінченно малі переміщення за нескінченно малі інтервали часу Dt , dt . Миттєва швидкість — величина векторна і має напрям дотичної в даній точці траєкторії.

Якщо швидкість тіла змінюється, його рух характеризується прискоренням.

Прискорення — це векторна величина, яка вимірюється відношенням зміни швидкості до часу, за який ця зміна відбулася. Миттєве прискорення визначається за формулою:

$$\overset{\mathbf{r}}{a} = \lim_{Dt \rightarrow 0} \frac{D\overset{\mathbf{r}}{V}}{Dt} = \frac{d\overset{\mathbf{r}}{V}}{dt}, \quad (1.8)$$

а середнє:

$$\overset{\mathbf{r}}{a}_c = \frac{D\overset{\mathbf{r}}{V}}{Dt} \quad (1.9)$$

Напрямок прискорення збігається з напрямом зміни швидкості на малому переміщенні. Одиниця прискорення в СІ 1 м/с^2 .

Прямолінійний рівнозмінний 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. Прискорення цього руху $\overset{\mathbf{r}}{a}$ величина стала і визначається за формулою:

$$\overset{\mathbf{r}}{a} = \frac{\overset{\mathbf{r}}{V} - \overset{\mathbf{r}}{V}_0}{t}, \quad (1.10)$$

де $\overset{\mathbf{r}}{V}_0$ — початкова швидкість;

$\overset{\mathbf{r}}{V}$ — швидкість в кінці інтервалу часу t .

З формули (1.10) можна визначити миттєву швидкість $\overset{\mathbf{r}}{V}$ у кінці інтервалу часу t :

$$\overset{\mathbf{r}}{V} = \overset{\mathbf{r}}{V}_0 \pm \overset{\mathbf{r}}{a}t, \quad (1.11)$$

або

$$\begin{aligned}
V_x &= V_{0x} \pm a_x t, \\
V_y &= V_{0y} \pm a_y t, \\
V_z &= V_{0z} \pm a_z t
\end{aligned}
\tag{1.12}$$

Проекцію середньої швидкості рівноприскореного руху можна знайти за формулою:

$$V_{cx} = \frac{V_{0x} + V_x}{2} \tag{1.13}$$

Проекцію переміщення іноді знаходять за проекцією середньої швидкості:

$$s_x = \frac{V_{0x} + V_x}{2} t \tag{1.14}$$

Переміщення при прямолінійному рівнозмінному русі визначають за формулою:

$$s = V_0 t \pm \frac{a t^2}{2} \tag{1.15}$$

Проекція переміщення на вісь OX:

$$s_x = V_{0x} t \pm \frac{a_x t^2}{2} \tag{1.16}$$

Координата

$$x = x_0 + V_{0x} t \pm \frac{a_x t^2}{2} \tag{1.17}$$

У прямолінійному рівноприскореному русі модуль переміщення чисельно дорівнює шляху. Якщо вісь OX напрямлена вздовж руху, шлях чисельно дорівнює проекції переміщення.

§ 3. Криволінійний рух

Рух, траєкторія якого крива лінія, називають *криволінійним*. У криволінійному русі переміщення тіла не збігається з траєкторією його руху, тому модуль переміщення не дорівнює шляху. Прикладами криволінійного руху є рух тіл по колу, еліпсу, параболі, гіперболі тощо.

Миттєва швидкість тіла в будь-якій точці криволінійної траєкторії напрямлена по дотичній до траєкторії в цій точці (рис.3) і визначається за формулою:

$$\vec{v} = \lim_{Dt \rightarrow 0} \frac{D\vec{s}}{Dt} = \frac{d\vec{s}}{dt}, \quad (1.18)$$

де $D\vec{s}$ і $d\vec{s}$ — нескінченно мале переміщення тіла, коли воно проходить через дану точку, за нескінченно малий інтервал часу Dt , dt .

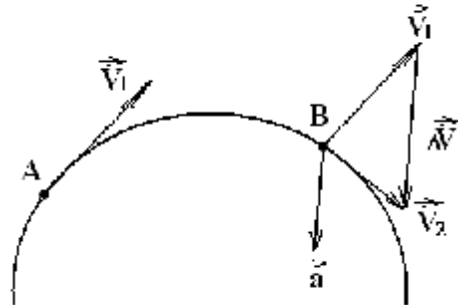


Рис.3

У криволінійному русі напрям швидкості завжди змінюється, тому тіло має *нормальне прискорення*, напрямлене перпендикулярно до швидкості в даній точці, тобто вздовж радіуса кривизни траєкторії. Модуль швидкості або сталий, або змінюється. Якщо модуль швидкості змінюється, тіло має *тангенціальне прискорення*. *Повне прискорення* при криволінійному русі дорівнює векторній сумі нормального і тангенціального прискорень. Модуль і напрям повного прискорення залежить від форми криволінійної траєкторії.

Рівномірний рух по колу. Зміну положення матеріальної точки під час руху по колу характеризує *шлях* (довжина дуги) або *кут повороту* рухомого радіуса, який з'єднує рухоме тіло із центром обертання (рис.4)

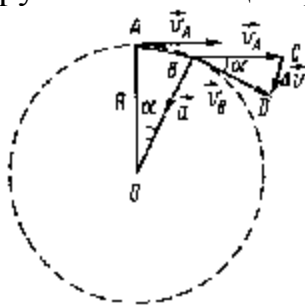


Рис.4

Кут повороту рухомого радіуса вимірюють у радіанах $1 \text{ рад} = 57^\circ 17' 48''$. Повний кут повороту дорівнює 2π радіанів.

Рух точки по колу характеризується *лінійною* і *кутовою* швидкостями.

Лінійна швидкість руху точки по колу — це її миттєва швидкість, яка завжди напрямлена по дотичній в даній точці траєкторії. Якщо рух рівномірний, модуль миттєвої швидкості з часом не змінюється.

Кількість обертів за одиницю часу рухомого радіуса, що з'єднує матеріальну точку з віссю обертання, називають *частотою* обертання n , а час одного оберту — *періодом* обертання T .

Зв'язок між періодом обертання і частотою такий: $T = \frac{1}{n}$.

У СІ період вимірюється в секундах (с), частота в обертах за секунду $\left(\frac{1}{с}\right)$.

Модуль лінійної швидкості точки при рівномірному русі по колу

$$V = \frac{2\pi r}{t}, \quad (1.19)$$

де r — радіус кола траєкторії руху.

Модуль кутової швидкості w точки, що рівномірно рухається по колу, — це величина, яка вимірюється відношенням кута повороту j рухомого радіуса до інтервалу часу t , протягом якого відбувся цей поворот.

$$w = \frac{j}{t} \quad (1.20)$$

Кутова швидкість — векторна величина, напрямлена вздовж осі обертання, її напрям визначається за правилом гвинта. У СІ кутова швидкість вимірюється в радіанах за секунду $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$. Модуль кутової швидкості при рівномірному русі тіла по колу дорівнює

$$w = \frac{2\pi}{T} = 2\pi n \quad (1.21)$$

Зв'язок між модулями лінійної і кутової швидкостей такий:

$$V = w r \quad (1.22)$$

При рівномірному русі по колу матеріальна точка має тільки нормальне прискорення, яке напрямлене вздовж радіуса до центра і називається *доцентровим прискоренням*. Тангенціальне прискорення дорівнює нулю.

Модуль доцентрового прискорення рівномірного руху точки по колу дорівнює:

$$a_n = \frac{V^2}{R} \quad (1.23)$$

Рівноприскорений рух по колу. Рух матеріальної точки, при якому кутова швидкість за будь-які послідовні інтервали часу змінюється на однакове значення, називають *рівноприскореним*.

Кутове прискорення \dot{w} рівноприскореного руху матеріальної точки по колу вимірюється відношенням зміни кутової швидкості $(\dot{w} - \dot{w}_0)$ до

інтервалу часу t , за який ця зміна відбулася:

$$\mathbf{e} = \frac{\dot{\mathbf{w}} - \dot{\mathbf{w}}_0}{t} \quad (1.24)$$

Якщо вісь OX розмістити в напрямі вектора $\dot{\mathbf{w}}$ то

$$e_x = \frac{w_x - w_{0x}}{t} \quad (1.25)$$

Проекція кутового прискорення додатна, якщо кутова швидкість зростає, і від'ємна, якщо зменшується. Кутове прискорення в рівноприскореному русі стале і вимірюється в СІ в радіанах на секунду в квадраті $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$.

Проекція кутової швидкості в будь-який момент часу дорівнює

$$w_x = w_{0x} \pm e_x t, \quad (1.26)$$

а кут повороту рухомого радіуса

$$j = j_0 + w_0 t \pm \frac{e t^2}{2}, \quad (1.27)$$

де j_0 - початковий кут повороту. Якщо $j_0 = 0$, то

$$w^2 - w_0^2 = 2e j \quad (1.28)$$

При рівноприскореному русі матеріальної точки по колу змінюється не тільки напрям, а й модуль лінійної швидкості. Величина, що вимірюється відношенням зміни модуля лінійної швидкості до часу, за який ця зміна відбулася, називається *тангенціальним* прискоренням:

$$a_t = \frac{V - V_0}{t}; \quad a_t = e r \quad (1.29)$$

Тангенціальне прискорення напрямлене по дотичній до траєкторії в даній точці в напрямі швидкості, якщо $V > V_0$, і протилежне, якщо $V < V_0$.

Повне прискорення при рівноприскореному русі по колу дорівнює

$$\dot{\mathbf{a}} = \dot{\mathbf{a}}_n + \dot{\mathbf{a}}_t \quad (1.30)$$

$$a^2 = a_n^2 + a_t^2 \quad (1.31)$$

Рух під дією сили тяжіння. Вільне падіння тіл. Силу тяжіння на невеликих висотах над поверхнею Землі можна вважати сталою. Падіння тіла, якщо опором повітря можна знехтувати, відбувається тільки під дією сили тяжіння. Тому вільне падіння тіл — це прямолінійний рівноприскорений рух. Якщо вісь OX спрямувати вертикально вниз, в проекції на цю вісь можна записати:

$$g_x > 0; \quad V_x = V_{0x} + g_x t; \quad h = V_{0x} t + \frac{g_x t^2}{2} \quad (1.32)$$

Тіло падатиме вільно тоді, коли $\dot{V}_0 = 0$ і коли його кинути вниз $\dot{V}_0 \neq 0$.

Рух тіла, кинутого вертикально вгору. Якщо вісь OX спрямувати вертикально вгору, то

$$g_x < 0; V_x = V_{0x} - g_x t; h = V_{0x} t - \frac{g_x t^2}{2} \quad (1.33)$$

Тіло рухається прямолінійно рівноприскорено і до найвищої точки його швидкість зменшується, а під час зворотного руху вниз — збільшується.

Рух тіла, кинутого під кутом до горизонту. Якщо тіло кинуте під кутом до горизонту, початкова швидкість його V_0 напрямлена до сили тяжіння під кутом, що відрізняється від 0° або 180° , і напрям та модуль швидкості руху тіла змінюються.

Проекції прискорення вільного падіння на координатні осі $g_x = 0; g_y < 0$.

Проекції початкової швидкості:

$$V_{0x} = V_0 \cos a; V_{0y} = V_0 \sin a \quad (1.34)$$

Проекції швидкості в будь-який момент часу:

$$V_x = V_{0x} = V_0 \cos a; V_y = V_{0y} - g_y t \quad (1.35)$$

Координати тіла під час руху:

$$x = V_x t; y = V_{0y} t - \frac{g_y t^2}{2} \quad (1.36)$$

Виключивши з останніх рівнянь час, знайдемо рівняння траєкторії руху тіла:

$$y = x \tan a - \frac{g_y}{2V_0^2 \cos^2 a} x^2 \quad (1.37)$$

Це рівняння параболи.

Час руху тіла від початкової до найвищої точки дорівнює часу руху його від найвищої точки до точки, яка знаходиться на рівні точки кидання, і його можна знайти за такою формулою

$$t = \frac{V_0 \sin a}{g} \quad (1.38)$$

Координату точки найбільшого підйому знаходимо за формулою:

$$y_{\max} = \frac{V_0^2 \sin^2 a}{2g} \quad (1.39)$$

Найбільшу дальність польоту знаходимо за формулою:

$$x_{\max} = \frac{V_0^2 \sin 2a}{g} \quad (1.40)$$

§ 4. Закони Ньютона

Для того щоб розв'язати основну задачу механіки, потрібно знати причини виникнення прискорення та способи його обчислення. Основоположник динаміки — англійський фізик І. Ньютон (1643—1727). Основні закони, сформульовані Ньютоном, справджуються не для довільного тіла, а для матеріальної точки.

Сила. Взаємодію тіл (частинок), дію поля на тіло (частинку) характеризує сила. Сила — це кількісна характеристика зовнішньої дії на тіло або частинку з боку інших тіл, частинок, полів, у результаті якої тіла і частинки набувають прискорення. Сила — величина векторна, напрям якої збігається з напрямом спричиненого прискорення. Силу вимірюють *динамометром* (рис.5).

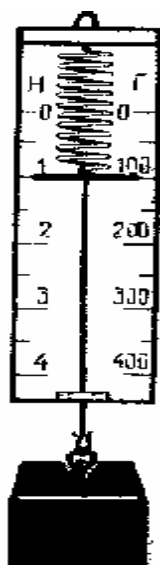


Рис.5

Одиницею сили в СІ є ньютон (Н).

У механіці розглядають гравітаційні сили, сили пружності та сили тертя. Модулі сил (незалежно від їх природи) однакові, якщо при одночасному прикладанні до матеріальної точки в протилежних напрямках ці сили не змінюють її швидкості, тобто не викликають прискорення.

Перший закон Ньютона. Сучасне формулювання першого закону Ньютона таке: *існують такі системи відліку, відносно яких тіла, що рухаються поступально, зберігають свою швидкість сталою, коли на них не діють інші тіла або їхня дія компенсується.* Цей закон справджується для матеріальної точки поступального руху протяжного тіла і не може бути застосований до обертального руху протяжного тіла.

Явище збереження тілом швидкості руху (і зокрема, стану спокою) в разі компенсації зовнішніх дій на тіло називають *інерцією*. Тому перший

закон Ньютона називають законом інерції.

Принцип відносності класичної механіки. 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 інерціальні. В них справджується перший закон Ньютона. *Неінерціальною* називається система відліку, що рухається з прискоренням відносно інерціальної.

У класичній механіці справджується *механічний принцип відносності* (принцип відносності Галілея): закони механіки однакові у всіх інерціальних системах відліку. Це означає, що в різних інерціальних системах відліку всі механічні процеси за однакових умов відбуваються однаково.

Маса. Швидкість тіл змінюється під час їх взаємодії, тобто в результаті дії сили. Зміна швидкості будь-якого тіла (частинки) можлива тільки за деякий інтервал часу. Властивість тіл (частинок), яка полягає в тому, що для зміни їх швидкості на певну величину потрібно, щоб дія на них інших тіл тривала певний час, називають *інертністю*. З двох тіл, що взаємодіють, інертність більша в того, якому потрібно більше часу, щоб на однакову величину змінилася їх швидкість (рис.6).



Рис.6

Кількісною мірою інертності тіл є їх маса. Маса — скалярна величина. Маса кількох з'єднаних тіл дорівнює сумі мас окремих тіл. Одиниця маси в СІ — кілограм (кг). Масу тіл вимірюють на важільних терезах або визначають за відношенням прискорень, яких набувають дане тіло і тіло (еталон), маса якого відома, під час взаємодії:

$$m_T = \frac{a_{eT}}{a_T} m_{eT} \quad (1.41)$$

Другий закон Ньютона. На тіло звичайно діє кілька сил. Прискорення, якого вони надають йому, визначається за другим законом Ньютона, його формулюють так: *прискорення, якого набуває тіло, прямо пропорційне рівнодійній сил, що діють на тіло, і обернено пропорційне його масі:*

$$\mathbf{r} \frac{\mathbf{F}}{\mathbf{m}} \quad (1.42)$$

Напрямок прискорення збігається з напрямом рівнодійної сили.

Другий закон Ньютона справджується в інерціальних системах відліку для матеріальної точки і тіл, які рухаються поступально.

Третій закон Ньютона. *Взаємодіючі тіла діють одне на одне з однаковими за модулем силами, напрямленими протилежно вздовж однієї прямої:*

$$\dot{\vec{F}}_1 = -\dot{\vec{F}}_2, \quad (1.43)$$

де $\dot{\vec{F}}_1$ — сила, з якою друге тіло діє на перше;

$\dot{\vec{F}}_2$ — сила, з якою перше тіло діє на друге.

Сили $\dot{\vec{F}}_1$ і $\dot{\vec{F}}_2$ прикладені до різних тіл і не зрівноважують одна одну. Третій закон Ньютона справджується тільки в інерціальних системах відліку.

§ 5. Сили в природі

У фізиці відомо чотири види сил: гравітаційні, електромагнітні, ядерні та сили слабкої взаємодії. У класичній механіці йдеться тільки про гравітаційні сили та сили електромагнітної природи—сили пружності і тертя.

Гравітаційні сили. Гравітаційна взаємодія властива всім тілам і частинкам. Поки що відоме тільки гравітаційне притягання. Сила гравітаційного притягання обчислюється за законом всесвітнього тяжіння, який встановив Ньютон: *усі тіла притягуються одне до одного із силою, прямо пропорційною добутку їх мас і обернено пропорційною квадрату відстані між ними:*

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (1.44)$$

де $G = 6,673 \times 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$ - гравітаційна стала, однакова для всіх тіл. Сили взаємного притягання прикладені до кожної матеріальної точки і напрямлені вздовж прямої, що з'єднує їх, тому ці сили називають *центральними*.

Величина, яка вимірюється відношенням сили тяжіння, що діє на матеріальну точку в даній точці гравітаційного поля, до маси цієї точки, називається *напруженістю* гравітаційного поля g

$$g = \frac{F}{m_1} = G \frac{m_2}{r^2} \quad (1.45)$$

Сила тяжіння — це сила, з якою Земля притягає тіло в результаті гравітаційної взаємодії

$$F_{\text{тяж}} = G \frac{Mm}{(R+h)^2} \quad (1.46)$$

де M — маса Землі;

m — маса тіла;

R — радіус Землі;

h — висота над поверхнею Землі.

Прискорення під дією цієї сили дорівнює напруженості гравітаційного поля в даній точці:

$$g_{\text{тяж}} = \frac{F_{\text{тяж}}}{m} = G \frac{M}{(R+h)^2} \quad (1.47)$$

Вага тіла. Силу, з якою тіло діє на опору або на підвіс внаслідок притягання до Землі, називають *вагою* тіла. Вага тіла прикладена до опори або підвісу, а не до тіла. Вага тіла в усіх інерціальних системах відліку однакова і якщо тіло нерухоме або рухається рівномірно і прямолінійно відносно Землі, вага його дорівнює силі тяжіння.

Перша космічна швидкість. Земля наближено має форму кулі, тому тіло, якому надано певної швидкості в горизонтальному напрямі, рухатиметься по коловій орбіті (перша космічна швидкість), тобто буде штучним супутником Землі. Сила тяжіння надаватиме йому доцентрового прискорення.

$$G \frac{mM}{(R+h)^2} = \frac{mv^2}{(R+h)}, \text{ або } mg = \frac{mV^2}{R+h} \quad (1.48)$$

Звідси модуль першої космічної швидкості:

$$V_1 = \sqrt{G \frac{M}{R+h}}; \quad V_1 = \sqrt{g(R+h)} \quad (1.49)$$

Для невеликих відстаней від поверхні Землі перша космічна швидкість дорівнює 8 км/с. Траєкторія тіла, швидкість якого більша за 8 км/с, але менша за 11,2 км/с (у горизонтальному напрямі), має форму еліпса.

Друга космічна швидкість. Найменшу швидкість, якої треба надати тілу біля поверхні Землі, щоб воно могло подолати тяжіння Землі і стати супутником Сонця, називають *другою космічною швидкістю*

$$\frac{mV^2}{2} = G \frac{Mm}{R}; \quad V_2 = \sqrt{2G \frac{M}{R}} = \sqrt{2gR} \quad (1.50)$$

Поблизу поверхні Землі $V_2 = 11,2 \frac{\text{км}}{\text{с}}$.

Другу космічну швидкість називають ще параболічною, бо траєкторією руху тіла буде парабола. Якщо швидкість тіла біля поверхні Землі перевищує 11,2 км/с, то траєкторією руху тіла буде гіпербола (рис.7).

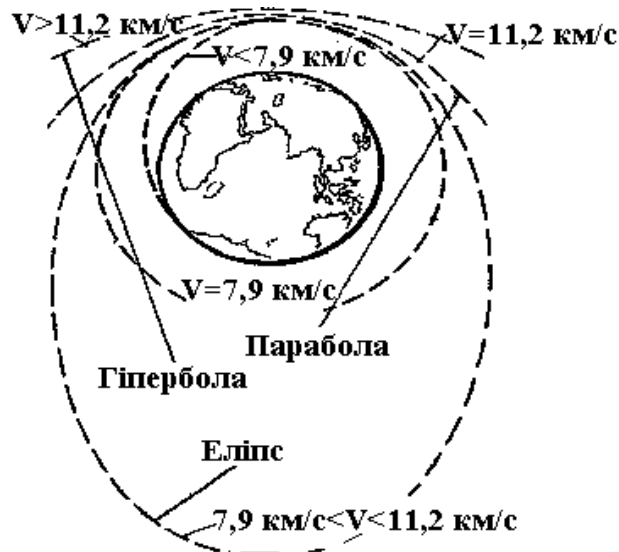


Рис.7

Сила пружності. Сила, яка виникає в тілі під час його деформації, називається *силою пружності*. Ця сила напрямлена в бік, протилежний до напрямку зміщення частинок тіла в момент деформації.

Англійський учений Р. Гук (1635—1703) встановив закон: *сила пружності F , що виникає в тілі в межах малої пружної деформації розтягу або стиску, пропорційна деформації x , але протилежна за напрямком:*

$$F = -kx, \quad (1.51)$$

де k — коефіцієнт жорсткості, який залежить від розмірів, форми і речовини тіла. У СІ коефіцієнт жорсткості вимірюється в ньютонах на метр (Н/м).

Сили тертя. Якщо тверде тіло ковзає по поверхні іншого твердого тіла, виникає сила, що протидіє цьому переміщенню — *сила тертя ковзання*. Модуль сили тертя ковзання F_m пропорційний модулю сили, з якою притискуються поверхні тіл, які труться, тобто модулю сили нормального тиску N

$$F_m = mN, \quad (1.52)$$

де m — коефіцієнт тертя, безрозмірна величина, яка залежить від матеріалу стикових поверхонь тіл, чистоти їх обробки і не залежить від площі стикових поверхонь.

Рівномірний рух тіла по колу — це рух з прискоренням. Цього прискорення, яке називається доцентровим, надає тілу одна або кілька сил, рівнодійна яких напрямлена вздовж радіуса до центра кола. Згідно з другим законом Ньютона модуль цієї сили визначається так:

$$F = m \frac{V^2}{r}; \quad F = mw^2 r; \quad F = mwV; \quad F = \frac{4p^2 r}{T^2} m \quad (1.53)$$

Наприклад, планетам, що рухаються навколо Сонця, доцентрового прискорення надає сила тяжіння між планетами і Сонцем.

§6. Елементи статички

Статика — це частина механіки, в якій вивчається рівновага тіла або системи тіл, на які діють сили. Під рівновагою розуміють стан спокою або рівномірного прямолінійного руху тіла. Статика не тільки визначає умови рівноваги тіл, а й вказує, як рухатиметься тіло, якщо рівновагу порушити.

Рівновага тіла, яке не обертається. Тіло, яке не обертається, перебуває в рівновазі, коли рівнодійна сил, прикладених до нього, дорівнює нулю:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n = 0 \quad (1.54)$$

Для сил, що діють на тіло в одній площині, умову рівноваги записують так:

$$F_{x1} + F_{x2} + \dots + F_{xn} = 0; F_{y1} + F_{y2} + \dots + F_{yn} = 0 \quad (1.55)$$

Рівновага тіла, яке може обертатися. Тіло, яке може обертатися навколо закріпленої осі, перебуває в рівновазі, якщо алгебраїчна сума моментів, прикладених до нього сил відносно цієї осі, дорівнює нулю:

$$M_1 + M_2 + \dots + M_n = 0 \quad (1.56)$$

Моментом сили називають величину, що дорівнює добутку плеча на силу

$$M = Fd \quad (1.57)$$

Плечем сили називають найкоротшу відстань від осі обертання тіла до прямої, вздовж якої діє на нього сила. Момент сили додатний, якщо він обертає тіло за рухом стрілки годинника. У СІ момент сили вимірюється в $H \cdot m$.

Загальна умова рівноваги тіла. Тіло перебуває в рівновазі, якщо геометрична сума сил, що діють на тіло, і алгебраїчна сума моментів сил дорівнюють нулю:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n = 0, M_1 + M_2 + \dots + M_n = 0 \quad (1.58)$$

§ 7. Робота, потужність, енергія

Робота. Механічною роботою називають фізичну величину, що характеризує дію сили, пов'язану з переміщенням тіла, і визначається формулою:

$$A = Fs \cos(\vec{F}, \vec{s}) \quad (1.59)$$

Робота — скалярна величина; $A > 0$, якщо $\mathcal{D}(\vec{F}, \vec{s}) < \frac{p}{2}$, $A < 0$, якщо $\mathcal{D}(\vec{F}, \vec{s}) > \frac{p}{2}$. У СІ роботу вимірюють у джоулях (Дж).

Якщо на тіло діє кілька сил, загальна робота дорівнює алгебраїчній сумі робіт, що виконуються кожною силою. Робота в різних інерціальних системах відліку різна, бо різне переміщення.

Робота сили тяжіння. Під час переміщення матеріальної точки масою m_1 відносно іншої матеріальної точки m_2 сили тяжіння виконують роботу:

$$A = Gm_1m_2 \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) \quad (1.60)$$

де r_1 і r_2 — відстані між точками в початковий і кінцевий моменти. Якщо $r_2 > r_1$, то $A < 0$ і якщо $r_2 < r_1$, то $A > 0$. Коли ж матеріальна точка переміщується в полі тяжіння Землі, виконується робота:

$$A = mg(h_1 - h_2) \quad (1.61)$$

Робота сили пружності. Пружно деформоване тіло при зміні деформації від x_1 до x_2 виконує роботу:

$$A = \frac{k}{2}(x_1^2 - x_2^2) \quad (1.62)$$

Робота сил тяжіння і сил пружності не залежить від форми траєкторії, а залежить від початкової і кінцевої координат тіла.

Потужність — це фізична величина, що характеризує швидкість виконання роботи і визначається за формулою:

$$N = \frac{A}{t} \quad (1.63)$$

Потужність — величина скалярна і в СІ вимірюється у ватах (1 Вт=1Дж/1 с).

Якщо на тіло діє зовнішня сила \vec{F} і воно рухається зі швидкістю \vec{V} , то потужність, яку розвиває ця сила, обчислюють за формулою:

$$N = Fv \cos(\vec{F} \wedge \vec{V}) \quad (1.64)$$

Енергія. Фізична величина, що характеризує механічний стан тіла (системи тіл), називається *механічною енергією*.

Кінетична енергія характеризує стан руху тіла і визначається за формулою:

$$K = \frac{mV^2}{2} \quad (1.65)$$

Зміна кінетичної енергії тіла дорівнює роботі прикладених до нього сил:

$$A = \frac{mV_2^2}{2} - \frac{mV_1^2}{2} \quad (1.66)$$

Потенціальна енергія характеризує взаємодію тіл або частинок і залежить від їх взаємного розміщення. Потенціальна енергія матеріальної точки масою m_1 в полі тяжіння точки масою m_2 обчислюється за формулою:

$$\Pi = -G \frac{m_1 m_2}{r}, \quad (1.67)$$

де r — відстань між матеріальними точками.

Потенціальну енергію тіла, піднятого від Землі на висоту h , обчислюють за формулою:

$$\Pi = mgh \quad (1.68)$$

Потенціальну енергію пружнодеформованого тіла обчислюють за формулою

$$\Pi = -\frac{kx^2}{2} \quad (1.69)$$

Повна механічна енергія тіла біля поверхні Землі дорівнює:

$$E = \frac{mV^2}{2} + mgh + \frac{kx^2}{2} \quad (1.70)$$

Енергія вимірюється тими самими одиницями, що й робота.

Для будь-якої системи тіл, у якій діють тільки внутрішні потенціальні сили, механічна енергія системи залишається сталою:

$$\frac{mV_1^2}{2} + mgh_1 + \frac{kx_1^2}{2} = \frac{mV_2^2}{2} + mgh_2 + \frac{kx_2^2}{2} \quad (1.71)$$

§ 8. Закон збереження імпульсу

Для замкненої системи геометрична сума імпульсів тіл до взаємодії дорівнює геометричній сумі імпульсів після взаємодії, або геометрична сума імпульсів тіл під час будь-яких взаємодій залишається сталою.

$$m_1 \dot{V}_1 + m_2 \dot{V}_2 + \dots + m_n \dot{V}_n = m_1 \dot{V}'_1 + m_2 \dot{V}'_2 + \dots + m_n \dot{V}'_n = const, \quad (1.72)$$

де \dot{V} і \dot{V}' — швидкості відповідних тіл до і після взаємодії. Це рівняння виражає закон збереження імпульсу.

Система тіл називається замкненою (ізолюваною), якщо на неї не діють зовнішні сили. Реально замкненою можна вважати систему, в якій зовнішні сили значно менші за внутрішні.

Рівняння (1.72) еквівалентне трьом рівнянням для проекцій:

$$\begin{aligned} m_1 V_{1x} + m_2 V_{2x} + \dots + m_n V_{nx} &= \text{const}, \\ m_1 V_{1y} + m_2 V_{2y} + \dots + m_n V_{ny} &= \text{const}, \\ m_1 V_{1z} + m_2 V_{2z} + \dots + m_n V_{nz} &= \text{const} \end{aligned} \quad (1.73)$$

Абсолютно пружним називається удар, під час якого зберігається не тільки геометрична сума імпульсів, а й сума кінетичних енергій взаємодіючих тіл. Розглянемо центральний удар двох куль, при якому швидкості обох куль напрямлені вздовж прямої, проведеної через центри куль. Систему відліку зв'яжемо з другою кулею ($V_2 = 0$) і запишемо закони збереження імпульсу і кінетичної енергії:

$$m_1 V_1 = m_1 u_1 + m_2 u_2; \quad \frac{m_1 V_1^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2} \quad (1.74)$$

Звідси

$$u_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} V_1; \quad u_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} V_1, \quad (1.75)$$

де u_1 і u_2 — швидкості куль після удару.

Абсолютно непружним називається удар, після якого форма тіл не відновлюється і обидва тіла рухаються як одне. Застосувавши закон збереження імпульсу

$$m_1 V_1 + m_2 V_2 = (m_1 + m_2) u,$$

дістанемо

$$u = \frac{m_1 V_1 + m_2 V_2}{m_1 + m_2} \quad (1.76)$$

§ 9. Динаміка обертального руху твердого тіла

Основна задача динаміки обертального руху твердого тіла— визначити кутові координати точок обертового тіла в будь-який момент часу за відомими початковими кутовими координатами, кутовою швидкістю і моментом зовнішніх сил, які діють на тіло.

Перший закон динаміки обертального руху. Якщо на тверде тіло не діють сили або момент сил дорівнює нулю, тіло перебуває в стані спокою ($w = 0$) або обертається зі сталою кутовою швидкістю ($w = \text{const}$, $e = 0$).

Момент інерції. В обертальному русі твердого тіла мірою його

інертних властивостей є *момент інерції*. Моментом інерції матеріальної точки відносно даної осі називають скалярну величину J , яка вимірюється добутком маси матеріальної точки m на квадрат її відстані r від осі обертання:

$$J = mr^2. \quad (1.77)$$

Моментом інерції тіла відносно осі називається величина, що дорівнює сумі моментів інерції всіх матеріальних точок, на які можна уявно поділити тіло, відносно даної осі. Момент інерції тіла залежить від вибору осі обертання.

Другий закон динаміки обертального руху твердого тіла

В інерціальній системі відліку кутове прискорення $\dot{\epsilon}$, якого тіло набуває відносно нерухомої осі обертання, прямо пропорційне моменту сил \dot{M} , які діють на тіло, і обернено пропорційне моменту інерції тіла J відносно цієї осі:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{M}}{J} \quad (1.78)$$

Робота, потужність та кінетична енергія при обертальному русі. Якщо до тіла, що має вісь обертання, прикладено момент сил \dot{M} , під дією яких здійснюється кутове переміщення j , то виконується робота:

$$A = M j \quad (1.79)$$

Якщо момент сили вимірювати в ньютон-метрах на метр і кутове переміщення в радіанах, робота вимірюватиметься в джоулях.

Потужність при обертальному русі обчислюється за формулою:

$$N = M w \quad (1.80)$$

Кінетична енергія тіла, яке обертається навколо осі з кутовою швидкістю w і має момент інерції J відносно цієї осі,

$$K = \frac{J w^2}{2} \quad (1.81)$$

Зміна кінетичної енергії обертального руху тіла дорівнює роботі сил, прикладених до тіла.

$$\frac{J w_2^2}{2} - \frac{J w_1^2}{2} = M(j_2 - j_1) \quad (1.82)$$

Якщо тіло бере участь одночасно в обертальному і поступальному русі, то його кінетичну енергію визначають за формулою:

$$K = \frac{mV^2}{2} + \frac{J w^2}{2}. \quad (1.83)$$

§ 10. Механіка рідин і газів

Тиск. Рідини і гази — це фізичні тіла, які не мають власної форми і набувають форми посудини, в яку їх вміщають. Частинки їх дуже рухливі і діють на стінки посудини з деякою силою тиску. *Тиском* називають величину, що дорівнює силі, яка діє на одиницю площі поверхні в перпендикулярному до неї напрямі. Якщо сила тиску розподіляється по поверхні рівномірно, тиск визначають за формулою:

$$p = \frac{F}{S}, \quad (1.84)$$

де F — сила тиску;

S — площа поверхні.

В СІ одиницею тиску є *паскаль* (Па) на честь французького вченого Б. Паскаля (1623—1662). Паскаль — тиск сили 1Н, рівномірно розподіленої по поверхні площею в 1 м^2 ($1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$).

Закон Паскаля. Розподіл сил у рідинах та газах знаходять за допомогою закону Паскаля (рис.8).

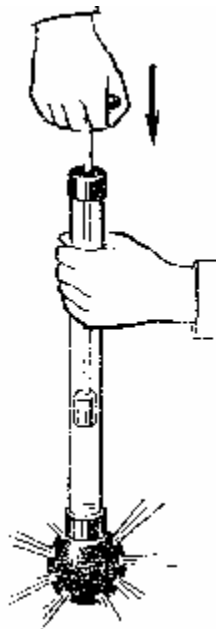


Рис.8

Тиск на нерухому рідину або газ передається без зміни в кожну точку рідини або газу.

Гідравлічний прес. Закон Паскаля використано в гідравлічних пресах. Два циліндри з поперечним перерізом S_1 і S_2 з'єднані між собою трубою (рис.9).

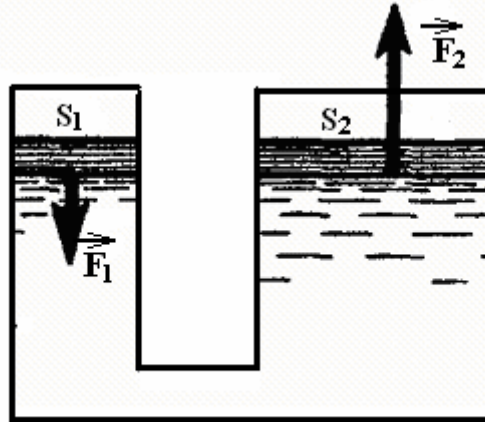


Рис.9

У циліндрах переміщуються поршні. Оскільки стисливість рідин дуже мала, об'єми рідин у кожному циліндрі змінюються на однакову величину $h_1 S_1 = h_2 S_2$ (де h_1 і h_2 — переміщення відповідно I та II поршнів). Гідравлічний прес дає значний вигравш у силі (за рахунок програшу в переміщенні):

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{h_1}{h_2}. \quad (1.85)$$

Гідравлічними пресами створюють величезні сили тиску до 150—200 МН.

Тиск рідин на дно і стінки посудини. Якщо на рідину діє тільки сила тяжіння, тиск p на будь-якому рівні всередині рідини визначається висотою шару її h над цим рівнем і не залежить від форми посудини:

$$p = r gh, \quad (1.86)$$

де r — густина рідини, g — прискорення вільного падіння.

Якщо вільна поверхня рідини перебуває під тиском p_0 , то на глибині h тиск

$$p = p_0 + r gh \quad (1.87)$$

Із закону Паскаля випливає так званий гідростатичний парадокс: сила тиску на дно посудини визначається лише висотою стовпа рідини і площею дна.

Сполучені посудини. Дві посудини (або кілька), з'єднані в нижній частині трубкою, по якій рідина може перетікати з однієї в іншу, називають *сполученими*. У сполучених посудинах вільні поверхні однорідної рідини встановлюються на одному рівні.

Вільні поверхні рідин, які не змішуються і мають різну густину r_1 і r_2 при однакових зовнішніх тисках, встановлюються в сполучених посудинах на різних рівнях h_1 і h_2 :

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{r_2}{r_1} \quad (1.88)$$

Атмосферний тиск. Земля оточена шаром повітря, який утримується біля неї силами тяжіння. Повітря це суміш азоту, кисню, вуглекислого та інших газів, а також парів води. Маса атмосферного повітря $5 \cdot 10^{18}$ кг розподілена по поверхні Землі площею $5 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$. Щоб визначити атмосферний тиск, італійський вчений Е. Торрічеллі (1608—1647) запаляв один кінець трубки (довжиною 1 м), налив у неї ртуть, перевернув і опустив у посудину з ртуттю. Частина її вилилася, а висота стовпа тієї ртуті, що залишилася, становила 760 мм. Тиск такого стовпа ртуті (над рівнем у посудині) дорівнює атмосферному і називається фізичною атмосферою ($1 \text{ ат} = 1010,25 \text{ кПа}$).

Для вимірювання атмосферного тиску використовують ртутні і мембранні (металеві) *барометри*. Ртутний барометр – це трубка Торрічеллі зі шкалою.

Архімедова сила. На поверхню зануреного в рідину тіла діють сили тиску. Оскільки верхня і нижня частини тіла знаходяться на різній глибині, сили тиску на них неоднакові, а їхня рівнодійна напрямлена вгору. Це так звана архімедова сила. Старогрецький вчений Архімед (близько 287—212 рр. до н. е.) встановив, що на занурене в рідину тіло діє напрямлена вертикально вгору виштовхувальна сила, яка дорівнює вазі витісненої тілом рідини:

$$F = r g V, \quad (1.89)$$

де r — густина рідини;

V — об'єм витісненої тілом рідини;

g — прискорення вільного падіння. Виштовхувальна сила прикладена до центра сил тяжіння витісненої тілом рідини.

Для того щоб занурене в рідину тіло вагою P знаходилося в рівновазі, треба, щоб $P - F = 0$ (вага тіла і виштовхувальна сила напрямлені в різні сторони). Коли $F < P$, тіло тоне, а коли $F > P$, тіло плаває (рис.10).

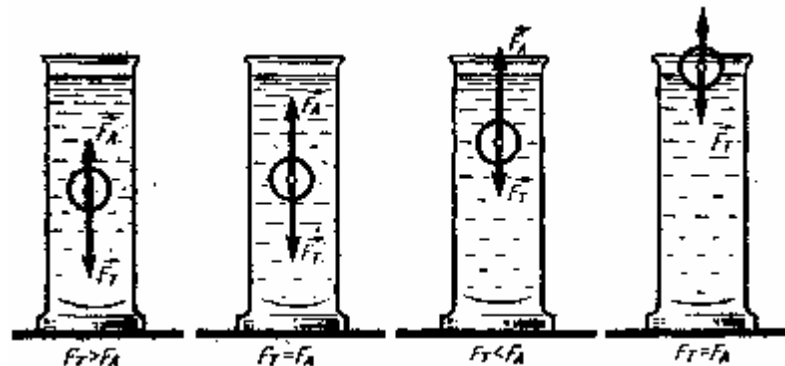


Рис.10

За допомогою формули (1.89) обчислюють архімедову силу тоді, коли вся рідина або газ перебувають у стані спокою або рівномірного

прямолінійного руху відносно Землі. Якщо рідина рухається з прискоренням, то на тіло, що знаходиться в ній, діє сила:

$$F = r(g - a)V, \quad (1.90)$$

де a — проекція прискорення руху рідини на напрямлену вертикально вниз вісь.

Рух ідеальної рідини. При стаціонарному русі через будь-який поперечний переріз труби за рівні проміжки часу проходять однакові об'єми рідини:

$$V_1 S_1 = V_2 S_2, \quad (1.91)$$

де V_1 і V_2 — швидкості руху частинок рідини через поперечні перерізи S_1 і S_2 , відповідно. Вираз (1.91) називають *рівнянням нерозривності течії*, і оскільки він справджується для будь-якого перерізу, можна записати: $VS = \text{const}$.

Згідно із законом Д. Бернуллі (1700—1782) *при сталій течії сума енергії кінетичної, потенціальної і енергії тиску деякої маси ідеальної рідини — величина стала:*

$$\frac{mV^2}{2} + mgh + pV_0 = \text{const}, \quad (1.92)$$

де V — швидкість руху певного об'єму V_0 рідини масою m на висоті h над деяким умовним рівнем;

p — тиск у тому самому перерізі (труби течії), зумовлений силами пружності всередині рідини. Розділивши рівняння (1.92) на V_0 , дістанемо:

$$r \frac{V^2}{2} + rgh + p = \text{const}, \quad (1.93)$$

де $r = \frac{m}{V_0}$ — густина рідини.

Під час руху рідини в трубі, розташованій горизонтально, зміна потенціальної енергії дорівнює 0 і рівняння (1.93) має вигляд:

$$\frac{rV^2}{2} + p = \text{const} \quad (1.94)$$

Закон Бернуллі виконується і для газу, якщо він рухається з невеликою швидкістю, без тертя і його об'єм майже не змінюється (тобто газ не стискується).

Розділ II

МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА

§ 1. Основи молекулярно-кінетичної теорії

Атоми і молекули. Усі відомі речовини складаються з простіших хімічних елементів. Найменшу стійку частинку хімічного елемента, що має його хімічні властивості, називають *атомом*. Хімічна сполука з двох або більшої кількості атомів — це *молекула*, тобто найменша частинка речовини, що має хімічні властивості цієї речовини. Розміри атомів і молекул дуже малі. Наприклад, діаметр молекули водню дорівнює $2,3 \times 10^{-10} \text{ м}$ їх не можна бачити неозброєним оком. Розміри складніших молекул можуть бути значно більшими (молекула білка має лінійні розміри близько $4,3 \times 10^{-9} \text{ м}$).

Тіла, що складаються з великої кількості атомів або молекул, називають *макроскопічними*. Маса окремої молекули або атома речовини дуже мала, наприклад, маса одного атома вуглецю $1,993 \times 10^{-26} \text{ кг}$. Зручно користуватися відносними значеннями мас молекул (або атомів). *Відносною молекулярною (або атомною) масою речовини M_r називають відношення маси молекули (або атома) m_0 даної речовини до однієї дванадцятої маси m_{0C} ізотопу $^{12}_6\text{C}$ атома вуглецю:*

$$M_r = \frac{m_0}{1/12 \times m_{0C}} \quad (2.1)$$

Відносна молекулярна або атомна маса—безрозмірна величина.

У СІ введено одиницю кількості речовини — *моль*.

Моль — це кількість речовини, що містить стільки молекул (або атомів), скільки атомів у 0,012 кг вуглецю. Один моль будь-якої речовини містить однакову кількість атомів або молекул. Це число називають числом Авогадро

$$N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ моль}^{-1} \quad (2.2)$$

Кількість молекул у n молях речовини можна визначити за формулою:

$$N = n N_A, \quad (2.3)$$

Масу одного моля речовини називають *молярною масою m* (мю).

$$m = m_0 N_A, \quad (2.4)$$

де m_0 —маса одного структурного елемента (атома або молекули). Маса будь-якої кількості речовини n дорівнює

$$m = nm. \quad (2.5)$$

Молярна маса в СІ вимірюється в кілограмах на моль (кг/моль).

Основні положення молекулярно-кінетичної теорії такі:

1. Усі речовини складаються з великої кількості частинок (атомів, молекул та іонів). Розміри їх дуже малі (близько 10^{-10} м).
2. Частинки речовини безперервно й хаотично рухаються. Цей хаотичний рух називають *теповим*.
3. Частинки взаємодіють одна з одною.

Броунівський рух. Доказом хаотичного руху молекул є спостережуваний під мікроскопом безладний безперервний рух нерозчинних у рідині малих крупинок твердої речовини, розмір яких близький до $10^{-4} - 10^{-5}$ см. Інтенсивність такого руху залежить від в'язкості рідини і з підвищенням температури зростає. Швидкість малих частинок більша, ніж великих. Рух надто великих частинок мало помітний.

Уперше явище хаотичного руху малих частинок спостерігав у 1827 р. англійський ботанік Р. Броун (1773— 1853), який використав у своєму досліді спори плауна. Рух у рідині або газі малих частинок під дією безладних поштовхів молекул, що перебувають у теплом русі, називають *броунівським*.

Дифузія. Явище взаємного самовільного проникнення речовин, що перебувають у контакті, зумовлене тепловим рухом молекул, називають *дифузією*. Прикладом дифузії в газах є поширення запахів у повітрі за умови, коли пряме перемішування відсутнє. Дифузію в рідинах спостерігають, наприклад, так. Якщо обережно налити в посудину дві рідини різної густини (розчину мідного купоросу і води), то спочатку межа поділу між ними добре помітна. Через якийсь час спостерігається взаємне проникнення однієї рідини в другу, і межа стає менш чіткою.

Підвищення температури прискорює дифузійні процеси. Мірою дифузії є маса речовини, що в процесі дифузії перемістилася за одиницю часу через одиницю площі поверхні зіткнення речовин. Дифузійні процеси приводять до вирівнювання концентрацій.

§ 2. Термодинаміка

Теплообмін. Частинки речовини (атоми, молекули або іони) у хаотичному русі, внаслідок безладних раптових поштовхів з боку інших частинок, змінюють свою кінетичну енергію. Однак середня кінетична енергія частинок речовини в стані термодинамічної рівноваги однакова.

Мірою середньої кінетичної енергії хаотичного руху частинок речовини є фізична величина — *температура*. Якщо середня кінетична енергія частинок деяких тіл, що стикаються (або різних частинок одного тіла), різна, то в результаті їх взаємодії їх кінетичні енергії зрівнюються. Частинки з більшою кінетичною енергією (більш нагріте тіло) передають частину своєї енергії частинкам з меншою кінетичною енергією (менш нагріте тіло). Так здійснюється *теплообмін*. *Теплотою* називають форму передавання енергії в результаті обміну енергією безпосередньо між

частинками, що перебувають у хаотичному тепловому русі.

Вимірювання температури. Зміна температури речовини приводить до зміни параметрів, що характеризують стан речовини (наприклад, об'єм, тиск, пружність), а також її фізичних властивостей (електричних, магнітних, оптичних та ін.). Спостерігаючи за зміною однієї з цих властивостей, можна фіксувати зміну температури. Прилад для вимірювання температури—*термометр* — приводять до теплової рівноваги з речовиною, температуру якої треба виміряти.

За нуль температури в шкалі Цельсія прийнято температуру, при якій перебувають у тепловій рівновазі вода і лід, а за 100°C —температуру кипіння води при нормальному тиску ($p_0 = 101325 \text{ Па}$). *Градус Цельсія*— це одна сота різниці між температурою кипіння води і температурою, при якій тоне лід (рис.11).

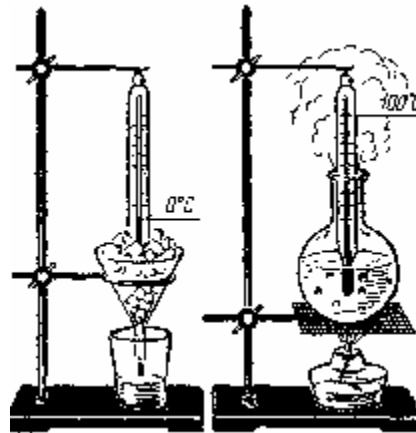


Рис.11

У шкалі Кельвіна за нуль прийнято температуру $-273,16^{\circ}\text{C}$. Досить рідко вживають шкалу Реомюра й шкалу Фаренгейта. Нуль відліку в шкалі Реомюра збігається з нулем шкали Цельсія, але градус у 1,25 раза більший, ніж за шкалою Цельсія. Тому температура кипіння води за шкалою Реомюра дорівнює 80° . Градус за шкалою Фаренгейта в 1,8 раза менший, ніж за шкалою Цельсія. Температура кипіння води за умов нормального тиску дорівнює 212° за шкалою Фаренгейта, а температура плавлення льоду дорівнює 32° .

Газові закони. Газ може бути в різних станах, тобто деяка маса газу має об'єм V , тиск p і температуру t . Величини V , p і t , що характеризують стан газу, називаються *термодинамічними параметрами*. Зміна одного з термодинамічних параметрів приводить до зміни решти. Вивчення процесів, у яких один з трьох параметрів V , або p , чи t залишається незмінним, дає змогу встановити газові закони.

Закон Бойля-Маріотта. Англійський вчений Р. Бойль (1627—1691) і французький Е. Маріотт (1620—1684) незалежно один від одного встановили закон зміни тиску газу незмінної маси при зміні його об'єму,

якщо температура залишається сталою. Такий процес зміни стану системи при сталій температурі називають *ізотермічним* (від грецьких слів *ізос* — однаковий і *термос* — теплий). Ізотермічний процес може відбуватися тільки в разі теплообміну системи з *термостатом*—зовнішньою системою, в якій підтримується стала температура. За законом Бойля-Маріотта *тиск даної маси газу при сталій температурі обернено пропорційний об'єму газу*. Отже,

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}, \text{ або } p_1 V_1 = p_2 V_2, \quad (2.6)$$

де p_1 — тиск газу, коли його об'єм V_1 ;

p_2 — тиск газу, коли об'єм його V_2 .

Криву залежності тиску газу від його об'єму при сталій температурі називають *ізотермою*. У координатах p, V ізотерма графічно зображується гіперболою. Вищій температурі відповідає гіпербола, що лежить вище.

Закон Бойля-Маріотта не справджується, коли тиск більший за 200 кПа.

Закон Гей-Люссака. Залежність об'єму газу від температури при сталому тиску встановив французький вчений Гей-Люссак (1778—1850). Процес зміни стану системи при сталому тиску називають *ізобарним* (від грецьких слів *ізос* однаковий і *барос*—вага). *Відносна зміна об'єму даної маси газу в ізобарному процесі прямо пропорційна зміні температури t* . Отже,

$$\frac{V - V_0}{V} = at, \quad (2.7)$$

або

$$V = V_0(1 + at), \quad (2.8)$$

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

V —його об'єм при температурі t ;

a — термічний коефіцієнт об'ємного розширення, він дорівнює відносній зміні об'єму газу, якщо газ нагріти при сталому тиску на один градус.

Дослід показує, що термічний коефіцієнт об'ємного розширення однаковий для всіх газів $a \approx \frac{1}{273} \text{K}^{-1}$.

Криву, яка графічно зображує залежність об'єму газу від температури при сталому тиску, називають *ізобарою*. Об'єм даної маси газу в умовах ізобарного процесу з підвищенням температури лінійно збільшується.

У координатах V, t ізобара зображається прямою. Якщо цю пряму продовжити в область низьких температур, вона перетне вісь температур у точці $t \approx -273^\circ \text{C}$.

Вищому тиску відповідає нижча ізобара.

Закон Гей-Люссака в області низьких температур не застосовний, оскільки об'єм газу не перетворюється на нуль при $t \gg -273^{\circ}\text{C}$. Усі гази при достатньо сильному охолодженні перетворюються на рідину.

Закон Шарля. Залежність тиску газу від температури при сталому об'ємі експериментально встановив французький фізик Шарль у 1787 р. Процес зміни стану системи при сталому об'ємі називаються *ізохорним* (від грецьких слів *іzos*—однаковий і *хорема*—місткість). *Тиск даної маси газу при сталому об'ємі пропорційний його абсолютній температурі, тобто*

$$p = p_0 g T, \quad (2.9)$$

де p_0 —тиск газу при $t = 0^{\circ}\text{C}$;

g —термічний коефіцієнт тиску газу, що дорівнює термічному коефіцієнту об'ємного розширення:

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

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

Ідеальний газ. Так називається газ, молекули якого не взаємодіють одна з одною на відстані і не мають власного об'єму. Газові закони справджуються саме для таких газів. Стан більшості реальних газів за умов атмосферного тиску і при кімнатній температурі мало відрізняється від стану ідеального газу. Найближчі до ідеального газу — газоподібні гелій і водень.

Абсолютна температура. Англійський вчений У. Томсон (У. Кельвін 1824—1907) запровадив *абсолютну шкалу температур*. За абсолютний нуль температури прийнято температуру $t = -273^{\circ}\text{C}$ (точніше $t = -273,16^{\circ}\text{C}$). Абсолютна температура T пов'язана з температурою t за шкалою Цельсія таким співвідношенням:

$$T = t + 273^{\circ}\text{C}. \quad (2.10)$$

Рівняння стану ідеального газу. Якщо змінювати всі три параметри p , V і T , що характеризують стан даної маси газу, то, користуючись газовими законами, можна встановити такий зв'язок між цими параметрами:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad \text{або} \quad \frac{pV}{T} = \text{const}. \quad (2.11)$$

Добуток тиску даної маси газу на об'єм, поділений на абсолютну температуру,— величина стала. У такій формі рівняння стану ідеального газу вперше записав французький фізик Б. Клапейрон (1799—1864), тому

його називають рівнянням Клапейрона. Числове значення сталої в (2.11) залежить від кількості газу.

Італійський фізик А. Авогадро (1776—1856) встановив, що в однакових об'ємах газів при однакових температурах і тисках міститься однакова кількість молекул (закон Авогадро). Згідно із цим законом, один моль різних газів при однакових тисках і температурах займає однаковий об'єм. За нормальних умов ($T_0 = 273^0 \text{ К}$, $p_0 = 101,3 \text{ кПа}$) об'єм моля будь-якого газу буде:

$$V_{0m} = 0,0224 \text{ м}^3 / \text{моль} . \quad (2.12)$$

Для моля газу стала в правій частині рівняння (2.11) однакова для всіх газів:

$$\frac{p_0 V_{0m}}{T_0} = R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \times \text{К}} . \quad (2.13)$$

Сталу R називають універсальною газовою сталою. Для одного моля ідеального газу згідно з (2.11) і (2.13) матимемо:

$$pV_m = RT . \quad (2.14)$$

Кількість молів у деякій масі газу $n = m / m$, тоді $V = nV_m = \frac{m}{m} V_m$ і загальна форма рівняння стану довільної маси ідеального газу має вигляд:

$$pV = \frac{m}{m} RT . \quad (2.15)$$

У такій формі рівняння вперше записав російський вчений Д. І. Менделєєв (1834-1907). Рівняння (2.15) називають *рівнянням Менделєєва-Клапейрона*.

Закон Дальтона. Якщо в об'ємі V знаходиться суміш газів, які не реагують один з одним, то, застосовуючи рівняння Менделєєва-Клапейрона для кожного газу, дістанемо:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \left(\frac{m_1}{m_1} + \frac{m_2}{m_2} + \dots + \frac{m_n}{m_n} \right) \frac{RT}{V} , \quad (2.16)$$

де m_i , m_i ($i = 1, 2, \dots, n$)—маса і молярна маса i -го газу. *Тиск суміші газів дорівнює сумі парціальних тисків газів, з яких складається ця суміш.* Цей закон встановив англійський фізик Дж. Дальтон (1766—1844).

Робота в термодинаміці. Змінити стан газу, тобто змінити його термодинамічні параметри, можна, нагріваючи газ або виконавши роботу. Так, під час розширення газ виконує роботу A' . Навколишні тіла (зовнішня сила) виконують над газом роботу A , причому робота в обох випадках однакова, її значення різняться лише знаком:

$$A = - A' \quad (2.17)$$

В ізобарному процесі ($p = const$) в результаті зміни об'єму газу від V_1

до V_2 робота дорівнює:

$$A' = p(V_2 - V_1) = pDV. \quad (2.18)$$

Отже, під час розширення газу, коли ($V_2 > V_1$), робота газу додатна ($A' > 0$), а робота зовнішньої сили від'ємна ($A < 0$). Під час стискування газу ($V_2 < V_1$), навпаки, робота газу від'ємна ($A' < 0$), а робота зовнішньої сили додатна ($A > 0$).

Кількість теплоти. Стан газу можна змінити не тільки під час виконання роботи, а й нагріваючи або охолоджуючи його. Якщо об'єм газу залишається незмінним, а змінюються тиск і температура, газ не виконує роботи. При цьому змінюється його внутрішня енергія. Процес зміни внутрішньої енергії тіла без виконання роботи називають *теплопередачею*, а явище передавання тепла — *теплопровідністю*. Різні речовини мають різну теплопровідність.

Величина, що є мірою зміни внутрішньої енергії в результаті теплопередачі, називається *кількістю теплоти*. Під час теплообміну частина внутрішньої енергії гарячого тіла передається холодному тілу. Отже, під час теплообміну енергія не перетворюється з однієї форми в іншу.

У СІ за одиницю кількості теплоти прийнято джоуль (Дж). Теплові властивості речовини характеризує їхня питома теплоємність c , тобто кількість теплоти, що її треба надати 1 кг речовини, щоб підвищити температуру на 1 К.

Одиниця вимірювання питомої теплоємності $\text{Дж}/(\text{кг} \times \text{К})$. Питома теплоємність залежить від того, при якому процесі відбувається передача теплоти. Щоб нагріти газ на 1 К при сталому об'ємі, йому треба передати меншу кількість теплоти, ніж для нагрівання його при сталому тиску, коли він розширюватиметься і виконуватиме роботу. Питомі теплоємності при сталому об'ємі і сталому тиску рідких і твердих тіл мало різняться між собою, оскільки ці тіла мало розширюються під час нагрівання.

Для нагрівання тіла масою m від температури t_1 до t_2 треба надати йому кількість теплоти:

$$Q = cm(t_2 - t_1), \quad (2.19)$$

де c - питома теплоємність тіла.

Кількість теплоти визначають спеціальним приладом — *калориметром*, будова якого забезпечує теплообмін між тілами в умовах ізоляції від впливу навколишнього середовища. Якщо тіло дістає теплоту, $Q > 0$, якщо ж віддає, $Q < 0$.

Рівняння теплового балансу. Під час теплообміну кількість теплоти, яку віддає більш нагріте тіло, дорівнює кількості теплоти, що її набуває менш нагріте тіло. Якщо в тепловому обміні бере участь кілька тіл, умова їхньої теплової рівноваги така:

$$c_1 m_1 (t_0 - t_1) + c_2 m_2 (t_0 - t_2) + \dots + c_n m_n (t_0 - t_n) = 0 \quad (2.20)$$

Це рівняння виражає закон збереження енергії при тепловому обміні і називається *рівнянням теплового балансу*.

Внутрішня енергія. Будь-яке макроскопічне тіло, крім механічної енергії (кінетичної енергії тіла, як цілого, та його потенціальної енергії), має внутрішню енергію, що дорівнює сумі кінетичних енергій хаотичного руху всіх частинок, з яких воно складається, і потенціальної енергії їх взаємодії. Внутрішня енергія однозначно характеризується термодинамічними параметрами системи, але одній і тій самій внутрішній енергії можуть відповідати різні стани системи. Ця енергія входить до загального балансу енергетичних перетворень у природі.

Перший закон термодинаміки. Збільшення внутрішньої енергії тіла може бути спричинене передаванням кількості теплоти Q , а також виконанням певної роботи A .

Численні досліди показують, що *енергія в природі не виникає з нічого і не зникає, а тільки переходить з однієї форми в іншу в еквівалентній кількості*. Цей закон збереження і перетворення енергії, поширений на теплові явища, називають *першим законом термодинаміки*.

Зміна внутрішньої енергії DU дорівнює сумі роботи зовнішніх сил A і кількості переданої тілу теплоти Q :

$$DU = A + Q \quad (2.21)$$

Це математичний запис першого закону термодинаміки. Якщо роботу виконує сама система над зовнішніми тілами, то $A' = -A$, тоді з (2.21) матимемо:

$$Q = DU + A' \quad (2.22)$$

Кількість теплоти, передана системі, йде на виконання роботи над зовнішніми тілами і зміну її внутрішньої енергії. Не можна говорити, що в системі є деяка кількість теплоти або роботи. Кількість теплоти і робота — це величини, що характеризують зміну енергії системи.

Адіабатний процес. Процес, що відбувається в теплоізолюваній системі без теплообміну із зовнішнім середовищем, називають *адіабатним*. За таких умов внутрішня енергія системи змінюється лише внаслідок виконання роботи:

$$DU = A. \quad (2.23)$$

Абсолютна теплоізоляція звичайно неможлива. Але деякі реальні процеси відбуваються як адіабатні, якщо вони досить швидкі і теплообміном можна знехтувати (наприклад, швидке розширення газу). Якщо газ розширюється дуже швидко, так що практично не відбувається теплообміну газу з атмосферою, внутрішня енергія його зменшується. При цьому швидко падає тиск і різко знижується температура.

Другий закон термодинаміки. Повний перехід кількості теплоти,

яку дістає система, в механічну роботу неможливий. Численні досліди показують, що частина енергії розсіюється, тобто частина кількості теплоти передається від більш нагрітого тіла (нагрівника) до менш нагрітого (холодильника). Отже, *неможливий процес, єдиним результатом якого було б перетворення всієї теплоти, здобутої від нагрівника, в еквівалентну їй роботу*. Це одне з формулювань *другого закону термодинаміки*.

Неможливо побудувати такий двигун (вічний двигун другого роду), робоче тіло якого, здійснюючи періодичний процес, виконувало б роботу за рахунок охолодження певного джерела теплоти (наприклад, води в океані, земної кори тощо). Неможливість побудувати вічний двигун другого роду доведено численними дослідями.

Коефіцієнт корисної дії теплового двигуна. Теплові двигуни перетворюють внутрішню енергію палива в механічну енергію. При цьому робоче тіло двигуна дістає кількість теплоти Q_1 від нагрівника, виконує роботу над зовнішніми тілами A_1 і передає кількість теплоти Q_2 холодильнику. Оскільки система після закінчення циклу повертається до початкового стану, зміна внутрішньої енергії дорівнює нулю ($DU = 0$) і за першим законом термодинаміки

$$A' = Q_1 - Q_2. \quad (2.24)$$

Коефіцієнтом корисної дії (ККД) теплового двигуна h називається відношення роботи A' , яку виконує двигун, до кількості теплоти Q_1 , яку двигун дістав від нагрівника:

$$h = \frac{A_1}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}, \quad (2.25)$$

тобто h завжди менше за одиницю.

Цикл Карно. Французький інженер і вчений Саді Карно з'ясував умови роботи ідеальної теплової машини. Він дослідив цикл, що складається з двох ізотерм та двох адіабат. Такий процес називають *циклом Карно*. У цьому циклі робоче тіло (ідеальний газ) виконує роботу завдяки наданій йому кількості теплоти (прямий цикл). При ізотермічному розширенні робоче тіло дістає кількість теплоти Q_1 від нагрівника, який є джерелом енергії, що зберігає сталу температуру T_1 , а при ізотермічному стисканні робоче тіло віддає кількість теплоти Q_2 холодильнику, що також має сталу температуру T_2 ($T_2 < T_1$). При адіабатному розширенні і стискуванні енергія зовні не надходить до робочого тіла, і ці процеси відбуваються за рахунок зміни його внутрішньої енергії. Установлено, що ККД циклу Карно не залежить від природи робочого тіла, а визначається тільки температурою нагрівника T_1 і холодильника T_2

$$h_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (2.26)$$

Доведено, що будь-яка реальна теплова машина, в якій температура нагрівника і холодильника відповідно T_1 і T_2 , не може мати ККД, більший за ККД ідеальної теплової машини h_{\max} , тобто

$$h \leq h_{\max} \quad (2.27)$$

З формули (2.26) випливає, що тепловий двигун тим ефективніший, чим вища температура нагрівника і нижча температура холодильника. Оскільки температура холодильника практично не може бути набагато нижчою за температуру навколишнього повітря, а обмежена теплостійкість матеріалів не дає можливості використовувати надто високі температури, максимальне значення ККД, наприклад при $T_1=800$ К і $T_2=300$ К, $h_{\max}=62\%$. ККД реальних теплових двигунів значно менший (від 20 до 40%). Підвищення ККД теплових двигунів має велике значення для народного господарства.

§ 3. Молекулярно-кінетична теорія ідеального газу

Модель ідеального газу. У найпростішій моделі ідеального газу молекули вважають дуже малими в граничному випадку точковими твердими кульками, що мають масу. В ідеальному газі можна знехтувати силами взаємодії між його молекулами, тобто середня кінетична енергія молекул ідеального газу в багато разів більша від потенціальної енергії їх взаємодії. Реальні гази подібні до ідеального газу, коли вони розріджені, тобто коли середня відстань між молекулами значно більша за їхні розміри.

Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів. Залежність між тиском газу p , його об'ємом V і кінетичною енергією хаотичного руху молекул E визначається з основного рівняння кінетичної теорії газів:

$$pV = \frac{2}{3}E, \quad (2.28)$$

де величина $E = \sum_{i=1}^n \frac{mv_i^2}{2}$ - сумарна кінетична енергія поступального руху всіх молекул газу, що містяться в об'ємі V . Тут m — маса молекули, v_i , — швидкість i -ї молекули.

Середнє значення квадрата швидкостей окремих молекул $v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_n$ дорівнює

$$\bar{v}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^2. \quad (2.29)$$

Отже,

$$E = \frac{1}{2}nm\bar{v}^2 = \frac{1}{2}M\bar{v}^2, \quad (2.30)$$

де $M = nm$ — маса газу.

Рівняння (2.28) можна записати так:

$$pV = \frac{1}{3}M\bar{v}^2, \quad (2.31)$$

або

$$p = \frac{1}{3}r\bar{v}^2, \quad (2.32)$$

де $r = nm/V$ — густина газу. Рівняння (2.32) називають *основним рівнянням молекулярно-кінетичної теорії газів*.

Тиск ідеального газу пропорційний густині газу і середньому квадрату швидкості руху молекул.

Для одного моля газу, що міститься в об'ємі V_m , можна записати:

$$pV_m = \frac{1}{3}N_A m \bar{v}^2 = \frac{2}{3}N_A \bar{E}, \quad (2.33)$$

де N_A — число Авогадро;

$\bar{E} = \frac{m\bar{v}^2}{2}$ — середня кінетична енергія хаотичного теплового руху молекул газу.

З формули (2.33) і рівняння Менделєєва-Клапейрона (2.15) випливає зв'язок між середньою кінетичною енергією молекул і температурою:

$$\bar{E} = \frac{3}{2} \frac{R}{N_A} T. \quad (2.34)$$

Середня кінетична енергія теплового руху молекул ідеального газу пропорційна абсолютній температурі.

Стала Больцмана. Відношення універсальної газової сталої R до числа Авогадро N_A називається сталою Больцмана на честь австрійського вченого Л. Больцмана (1844—1906). Стала Больцмана дорівнює:

$$k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \times 10^{-23} \text{ Дж / К}. \quad (2.35)$$

Рівняння (2.35) тепер записується так:

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT. \quad (2.36)$$

З (2.34), (2.35) та (2.36) маємо:

$$p = \frac{1}{3}nm\bar{v}^2 = \frac{2}{3}n\bar{E} = nkT, \quad (2.37)$$

Кількість молекул будь-якого газу в одному кубічному сантиметрі

за нормальних умов ($p_0 = 101325 \text{ Па}$, $T = 273 \text{ К}$) називається *числом Лошмідта*: $n = 2,69 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Внутрішня енергія ідеального газу. Для ідеального газу потенціальну енергію молекул можна не враховувати, коли дві молекули безпосередньо стикаються одна з одною. Внутрішня енергія ідеального газу складається з кінетичних енергій хаотичного теплового руху його молекул. Кінетична енергія молекули, побудованої з кількох атомів, дорівнює сумі енергій поступального, обертального та коливального рухів цих атомів.

Установлено, що внутрішня енергія одноатомного ідеального газу

$$U = \frac{3}{2} m RT . \quad (2.38)$$

Внутрішня енергія U не залежить від об'єму газу. Під час виконання роботи, коли змінюється внутрішня енергія ідеального газу, змінюється і його температура.

Водяна пара в атмосфері. Повітря завжди містить певну кількість водяної пари. Кількість грамів водяної пари в 1 м^3 повітря називають *абсолютною вологістю повітря*. Атмосферне повітря це—суміш різних газів і водяної пари, тому атмосферний тиск повітря дорівнює сумі парціальних тисків складових суміші. *Пружністю водяної пари* називають її тиск p , коли б не було інших газів. *Відносною вологістю повітря j* називають відношення пружності p водяної пари, яка є в повітрі при даній температурі, до тиску p_0 насиченої пари при тій самій температурі, помножене на 100%.

$$j = \frac{p}{p_0} \times 100\% \quad (2.39)$$

Якщо повітря в ізобарних умовах ($p = \text{const}$) охолоджується, а абсолютна вологість повітря не змінюється, то при певній температурі t_p водяна пара стане насиченою. Температуру t_p , при якій водяна пара стає насиченою, називають *точкою роси*. Якщо охолодження повітря продовжується до точки роси і нижче, починається конденсація пари (випадає роса, виникає туман).

§ 4. Поверхневий натяг і деякі властивості рідин

Молекулярна картина поверхневого шару. Поверхня поділу рідини і газу—це шар завтовшки кілька молекулярних розмірів. На молекулу поверхневого шару діють сусідні молекули з глибших шарів рідини (силами взаємодії молекул рідини, що знаходяться біля поверхні рідини, з молекулами пари можна знехтувати, оскільки густина газу при температурі, нижчій за критичну, значно менша, ніж густина рідини).

Внаслідок цього рідина в поверхневому шарі перебуває в розтягнутому напруженому стані. Густина рідини в цьому шарі менша, ніж усередині.

Поверхнева енергія. 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*. З термодинамічного погляду поверхнева енергія — один з видів внутрішньої енергії рідини. Відношення поверхневої енергії U_n будь-якої частини поверхні рідини до площі S цієї поверхні називається *коефіцієнтом поверхневого натягу* s :

$$s = \frac{U_n}{S} \quad (2.40)$$

Він залежить від природи речовин, що перебувають по обидва боки від поверхні поділу, і від температури.

Стан рівноваги рідини відповідає мінімальному значенню поверхневої енергії, тобто площа поверхні тіла мінімальна при даному об'ємі. Тому завислі в повітрі маленькі краплі рідини мають кулясту форму.

Уздовж поверхні рідини діють сили, що зменшують її площу, їх називають *силами поверхневого натягу* F , вони діють по дотичній до поверхні перпендикулярно до лінії, що обмежує поверхню поділу (рис.12).

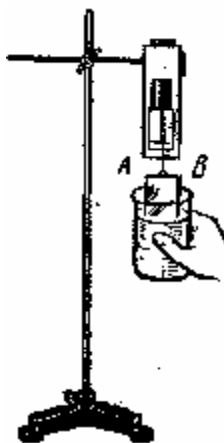


Рис.12

Якщо ця лінія має довжину l , то

$$F = s l. \quad (2.41)$$

Коефіцієнт поверхневого натягу вимірюють в одиницях Дж/м² і Н/м. На межі рідини і насиченої пари коефіцієнт поверхневого натягу з підвищенням температури зменшується і при критичній температурі дорівнює нулю.

Капілярні явища. Коли рідина змочує тверде тіло, кут q між її

поверхнею і стінкою посудини гострий. Якщо рідина не змочує тверде тіло, то кут q тупий. Змочуюча рідина, густина якої r , піднімається в тонких трубках-капілярах на висоту h над загальним рівнем рідини (рис.13):

$$h = \frac{2s}{rgr}, \quad (2.42)$$

де r — радіус капіляра.

Рідина, що не змочує стінки капіляра, опускається нижче рівня рідини на таку саму висоту h .

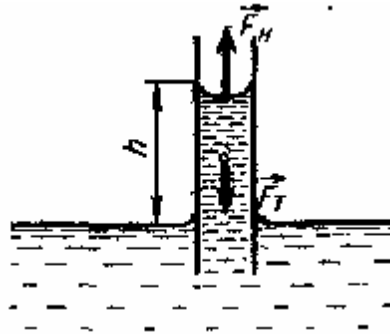


Рис.13

Теплове розширення твердих тіл. У межах не дуже великих інтервалів температур лінійні розміри твердого тіла l і його об'єм V змінюються за лінійним законом:

$$l = l_0(1 + at); \quad (2.43)$$

$$V = V_0(1 + bt), \quad (2.44)$$

де l_0 і V_0 — довжина й об'єм тіла при $t=0^\circ\text{C}$;

a і b — коефіцієнти лінійного та об'ємного розширення, які визначаються відповідною зміною довжини й об'єму тіла, взятого при 0°C , якщо його нагріти на 1°C . Лінійне теплове розширення твердих тіл незначне (близько 10^{-5} - 10^{-6} K^{-1}), а $b \gg 3a$.

Розділ III

ЕЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

§ 1. Електростатика

Електричний заряд. Електризація тіл. Електричний заряд — це фізична величина, яка характеризує властивість тіл вступати за певних умов в електромагнітні взаємодії. У природі існують заряди двох видів. Однойменні заряди відштовхуються, різнойменні — притягуються. У незарядженому тілі кількість позитивних і негативних зарядів однакова. Тілу можна передати більший або менший заряд.

Одиниця заряду в СІ — кулон (Кл).

Електрон — найменша частинка з елементарним негативним зарядом, що дорівнює $1,6 \times 10^{-19}$ Кл. Існує позитивно заряджена частинка — *протон*, заряд якої за абсолютним значенням дорівнює заряду електрона.

Електричні заряди називають *точковими*, якщо розміри заряджених тіл набагато менші за відстані між ними.

Явище передачі тілу електричного заряду називається електризацією.

В електризації беруть участь щонайменше два тіла (тертя тільки поліпшує контакт між ними).

Закон збереження електричних зарядів. У ізольованій системі алгебраїчна сума зарядів завжди залишається сталою: $q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}$.

Закон Кулона. Властивості і взаємодію нерухомих в інерціальній системі відліку електрично заряджених тіл або частинок з електричним зарядом, вивчає *електростатика*. Французький вчений Ш. Кулон (1736—1806) 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 добутку модулів зарядів і обернено пропорційною квадрату відстані між ними та напрямленою вздовж прямої, що їх з'єднує:*

$$F = \frac{1}{4\pi \epsilon \epsilon_0} \frac{|q_1| \times |q_2|}{r^2}, \quad (3.1)$$

де $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ Кл² / Н × м² - електрична стала,

ϵ — діелектрична проникність середовища (для вакууму $\epsilon = 1$). *Діелектрична проникність середовища* — це фізична величина, що характеризує електричні властивості речовини і показує, в скільки разів сила F взаємодії зарядів у даному середовищі менша за силу F_0 їх взає-

модії у вакуумі:

$$e = \frac{F}{F_0}. \quad (3.2)$$

Кулонівські сили — центральні. Сили відштовхування вважають додатними, а сили притягання — від'ємними.

Напруженість електричного поля. Навколо електричних зарядів існує електричне поле. Графічно електричне поле позитивного та негативного зарядів зображають з допомогою ліній напруженості (рис.14).

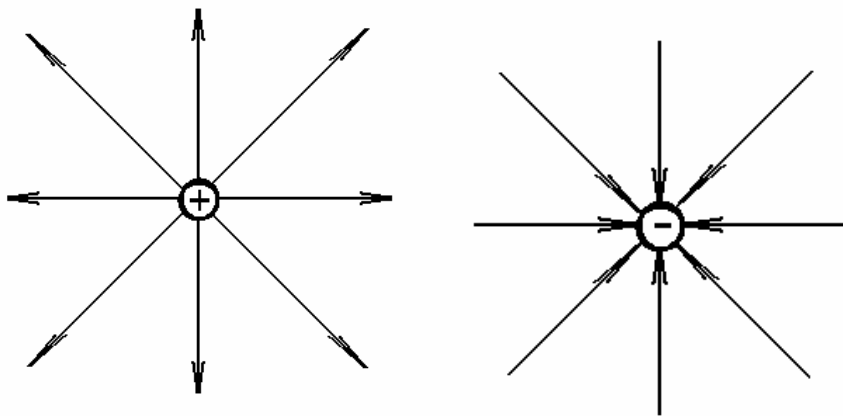


Рис.14

На розташовані в ньому електричні заряди завжди діє деяка сила, тому електричне поле характеризується векторною величиною — *напруженістю*, яка вимірюється силою, що діє в даній точці поля на одиничний точковий заряд q :

$$\vec{E} = \vec{F} / q \quad (3.3)$$

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 ($q < 0$).

Електричне поле називається *однорідним*, якщо в кожній його точці вектори напруженості \vec{E} однакові. Напруженість електричного поля вимірюють у ньютонях на кулон (Н/Кл).

За *принципом суперпозиції* полів результуюча напруженість електричного поля кількох зарядів дорівнює геометричній сумі напруженостей полів кожного окремого заряду (рис.15):

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n \quad (3.4)$$

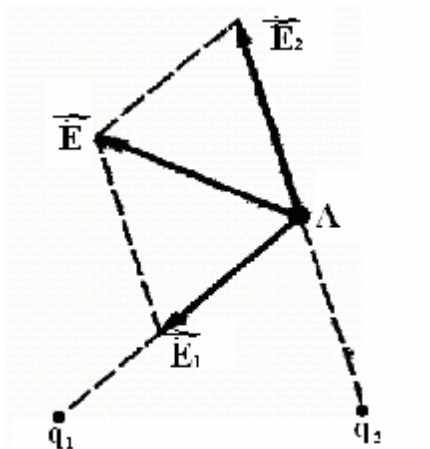


Рис.15

Електричні поля окремих зарядів не впливають одне на одне, і їхня дія не залежить від наявності інших полів — у цьому полягає принцип суперпозиції полів.

Лінії напруженості електричного поля. Графічно електричне поле зображують *лініями напруженості* (силовими лініями). Дотична до силової лінії в кожній точці збігається з вектором напруженості \vec{E} . Силкові лінії ніде не перетинаються, вони починаються на позитивних зарядах і закінчуються на негативних і завжди перпендикулярні до поверхні провідника (рис.16).

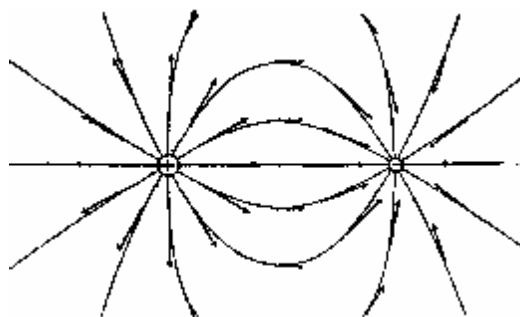


Рис.16

Провідники в електричному полі. У провідниках під впливом електричного поля вільні заряди переміщуються впорядковано і перерозподіляються так, що напруженість результуючого поля всередині провідника дуже швидко зменшується до нуля, в результаті чого впорядкований рух зарядів припиняється. Отже, електричного поля всередині провідника немає. Це використовують для електростатичного захисту, вміщуючи прилади в металеві ящики. Коли заряди перебувають у рівновазі, статичний заряд провідника зосереджений на його поверхні.

Вектор напруженості електростатичного поля поза провідником завжди перпендикулярний до його поверхні.

До провідників належать метали, водні розчини солей і кислот. У металах носії вільних зарядів є електрони.

Електричне поле зарядженої провідної кулі. Напруженість електричного поля точкового заряду

$$E = \frac{1}{4\pi e e_0} \frac{|q|}{r^2} \quad (3.5)$$

Напруженість електричного поля навколо зарядженої кулі також визначається за формулою (3.5). У середині провідної кулі поле відсутнє.

Напруженість електричного поля рівномірно зарядженої нескінченної пластини

$$E = \frac{|s|}{2e e_0}, \quad (3.6)$$

де s — поверхнева густина заряду, тобто заряд, що припадає на одиницю площі поверхні: $s = q/S$. Напруженість поля рівномірно зарядженої нескінченної пластини в кожній точці простору незалежно від відстані однакова, електричне поле — однорідне.

Робота сил електричного поля з переміщення заряду. Під час переміщення тіла із зарядом q на відстань s в електричному полі з напруженістю \vec{E} під дією сили \vec{F} виконується робота:

$$A = F \times s \cos \alpha, \quad (3.7)$$

де α — кут між напрямом сили і напрямом переміщення. Ця робота не залежить від форми траєкторії руху і визначається тільки кінцевим і початковим положенням зарядженого тіла. Поля з такими властивостями називають *потенціальними*. Робота в цьому випадку дорівнює зміні потенціальної енергії тіла, взятої з протилежним знаком: $A = W_{p2} - W_{p1}$, де $W_p = qEs$. Якщо шлях замкнутий, робота дорівнює нулю.

Потенціал. Різниця потенціалів. *Потенціалом* електричного поля в даній точці називають відношення потенціальної енергії заряду (зарядженого тіла) до величини цього заряду:

$$j = \frac{W_p}{q}. \quad (3.8)$$

Потенціал чисельно дорівнює роботі сил поля, яку потрібно затратити для переміщення одиничного позитивного заряду з даної точки в нескінченність: $j = \frac{A}{q}$. Потенціал поля — величина скалярна. При переміщенні одиничного заряду з точки A в точку B виконується робота:

$$j_A - j_B = \frac{A}{q}, \quad (3.9)$$

яка залежить тільки від електричного поля і може бути його характеристикою. Ця величина називається *різницею потенціалів* й між

точками A і B або електричною напругою: $U = j_A - j_B$. У СІ напругу вимірюють у вольтах (В): $1\text{В} = \frac{1\text{Дж}}{1\text{Кл}}$.

Еквіпотенціальною поверхнею або поверхнею однакового потенціалу називають поверхню, проведену перпендикулярно до силових ліній, різниця потенціалів для двох довільних точок якої дорівнює нулю. Під час переміщення заряду по еквіпотенціальній поверхні робота дорівнює нулю. В однорідному полі еквіпотенціальні поверхні мають вигляд паралельних площин, в полі точкового заряду — концентричних сфер (рис.17).

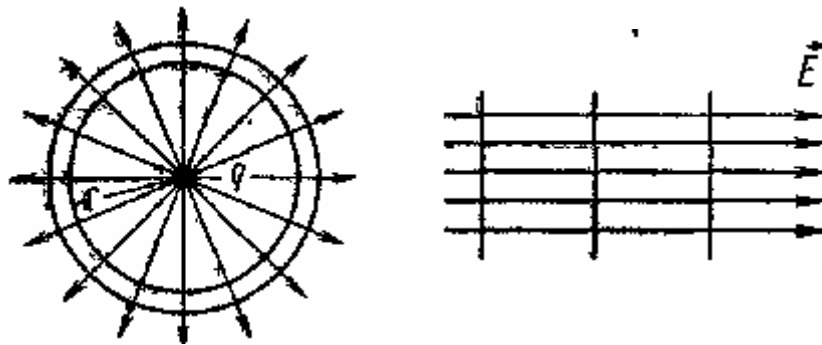


Рис.17

Поверхня будь-якого провідника в електричному полі — еквіпотенціальна.

Зв'язок між різницею потенціалів і напруженістю однорідного електричного поля такий:

$$E = \frac{j_1 - j_2}{d} = \frac{U}{d}, \quad (3.10)$$

де d — відстань між двома точками з потенціалами j_1 та j_2 . Вектор напруженості електричного поля завжди спрямований в бік зменшення потенціалу. Одиниця напруженості в СІ $1\text{В/м}=1\text{Н/Кл}$. Потенціал поля точкового заряду q на відстані r від нього:

$$j = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q}{r}. \quad (3.11)$$

Потенціал поля кількох зарядів у даній точці дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів полів усіх зарядів: $j = j_1 + j_2 + j_3 + \dots + j_n$. Потенціали вимірюють за допомогою *електрометрів*.

Електроємність. Конденсатори. *Електроємністю* (ємністю) провідника C називають величину, що дорівнює відношенню заряду q , наданого провіднику, до його потенціалу j :

$$C = \frac{q}{j}. \quad (3.12)$$

Ємність провідника залежить від його форми, лінійних розмірів і діелектричної проникності середовища і не залежить ні від заряду, ні від потенціалу. В СІ одиниця ємності називається фарад (Ф). Ємність кулі, радіус якої r ,

$$C = 4\pi \epsilon_0 \epsilon r. \quad (3.13)$$

Ємність Землі: $C_3 = 709 \text{ мкф}$.

Конденсатором називають систему двох або кількох провідників, розділених шаром діелектрика, товщина якого мала порівняно з розмірами провідників. Такі провідники називають *обкладками* конденсатора. Ємність плоского конденсатора (дві паралельні пластини):

$$C = \frac{q}{j_1 - j_2} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}, \quad (3.14)$$

де $(j_1 - j_2)$ — різниця потенціалів між пластинами конденсатора;

d — відстань між пластинами;

S — площа поверхні однієї з пластин.

Ємність конденсатора з n пластин:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S(n-1)}{d}. \quad (3.15)$$

З'єднання конденсаторів. Конденсатори з'єднують у батареї паралельно або послідовно. Ємність батареї конденсаторів, з'єднаних паралельно, дорівнює:

$$C_{\text{пар}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n, \quad (3.16)$$

а з'єднаних послідовно визначається за формулою:

$$\frac{1}{C_{\text{посл}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}. \quad (3.17)$$

Енергія електричного поля. Енергія електричного поля зарядженого провідника обчислюється за формулами:

$$W_e = \frac{Cj^2}{2} = \frac{qj}{2} = \frac{q^2}{2C}, \quad (3.18)$$

де C — ємність провідника;

q — його заряд;

j — потенціал.

Об'ємна густина енергії електричного поля з напруженістю E :

$$w = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2}. \quad (3.19)$$

§ 2. Закони постійного струму

Електричний струм. *Електричним струмом називають упорядкований напрямлений рух заряджених частинок.* Носіями зарядів під час проходження електричного струму можуть бути вільні електрони (електронна провідність) або іони (іонна провідність). Можлива також змішана провідність. За напрям струму умовно приймають напрям руху позитивних зарядів, хоча насправді в металах електричний струм зумовлений рухом електронів у напрямі, протилежному напрямку струму. Електричний струм спричиняє теплову, хімічну і магнітну дії.

Кількісними характеристиками електричного струму є *сила струму*, тобто заряд, що проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу:

$$I = \frac{Dq}{Dt}, \quad (3.20)$$

і *густина струму*, що визначається зарядом, який проходить за одиницю часу через одиницю площі поперечного перерізу провідника, розташованого перпендикулярно до напрямку струму:

$$j = \frac{Dq}{Dt S} = \frac{I}{S}. \quad (3.21)$$

Якщо сила струму з часом не змінюється, струм називають *постійним*.

У СІ одиницею сили струму є ампер (А) на честь французького вченого А. Ампера (1775—1836). Силу струму вимірюють за допомогою *амперметра*.

Для переміщення заряду q по деякій ділянці провідника потрібно виконати певну роботу A . Напруга на даній ділянці чисельно дорівнює роботі з переміщення одиничного заряду:

$$U = \frac{A}{q}. \quad (3.22)$$

Напругу вимірюють за допомогою *вольтметра*. Для того щоб на кінцях провідника підтримувалася стала різниця потенціалів (напруга) і по провіднику проходив постійний струм, потрібна дія сторонніх сил. Характеризує сторонні сили фізична величина, що називається *електрорушійною силою* (ЕРС). Вона дорівнює роботі сторонніх сил з переміщення одиничного позитивного заряду в замкнутому електричному колі:

$$E = \frac{A_{\text{стор}}}{q}. \quad (3.23)$$

Напругу і ЕРС вимірюють у вольтах. Напруга на будь-якій ділянці кола, в якому діє ЕРС E :

$$U = (j_A - j_B) + E, \quad (3.24)$$

де $(j_A - j_B)$ — різниця потенціалів на цій ділянці. Для ділянки однорідного кола, в якому відсутня ЕРС:

$$U = (j_A - j_B). \quad (3.25)$$

Закон Ома. На ділянці однорідного кола сила струму прямо пропорційна прикладеній напрузі U і обернено пропорційна опорю ділянки R :

$$I = \frac{U}{R}. \quad (3.26)$$

Величина $1/R$ називається *електропровідністю* або провідністю провідника. Опір провідника залежить від його довжини l , площі поперечного перерізу S і властивостей матеріалу:

$$R = r \frac{L}{S}, \quad (3.27)$$

де r — *питомий опір* провідника. Величина $s = \frac{1}{r}$ називається *питомою провідністю* провідника. Опір вимірюють за допомогою *омметра*.

У СІ одиницею опору є ом (Ом) на честь німецького вченого Г.-С. Ома (1787—1854). Питомий опір вимірюють в **Ом·м**.

Зі збільшенням температури опір більшості металів зростає (рис.18). *Температурним коефіцієнтом опору* називається відношення зміни опору провідника при нагріванні на 1°C до його опору при 0°C :

$$a = \frac{R - R_0}{R_0 t}. \quad (3.28)$$

Оскільки a майже не залежить від температури, питомий опір пропорційний температурі:

$$r_t = r(1 + at). \quad (3.29)$$

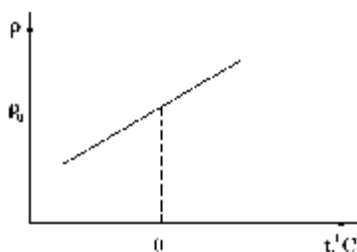


Рис.18

Для чистих металів $a = \frac{1}{273} \text{K}^{-1}$. У загальному випадку a змінюється з температурою. Залежність опору провідників від температури використовують у термометрах опору.

Закон Ома для замкнутого (повного) кола. У замкнутому колі, що має зовнішній опір R , джерело струму з ЕРС E і внутрішнім опором r , сила струму дорівнює відношенню ЕРС до повного опору кола:

$$I = \frac{E}{R + r}. \quad (3.30)$$

Послідовне та паралельне з'єднання провідників. Опір кола з послідовно з'єднаними кількома (n) провідниками дорівнює сумі опорів окремих провідників (рис.19, а):

$$R_{\text{посл.}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (3.31)$$

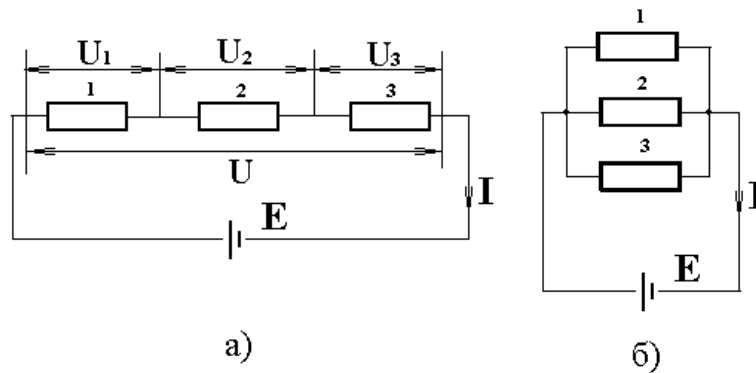


Рис.19

При *паралельному* з'єднанні провідників загальний опір кола $R_{\text{пар}}$ визначається (рис.19, б)

$$\frac{1}{R_{\text{пар.}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (3.32)$$

Робота і потужність струму. Якщо заряд q переміщується між двома точками з різницею потенціалів U за час t , електричне поле виконує роботу:

$$A = qU = IUt. \quad (3.33)$$

Енергія джерела струму перетворюється частково або повністю у внутрішню енергію (нагрівання) провідників або в механічну енергію. Якщо вимірювати силу струму в амперах, напругу у вольтах, час у секундах, то *робота струму* виражатиметься в джоулях.

Скориставшись законом Ома, роботу струму можна виразити через силу струму або напругу:

$$A = I^2 R t, \quad (3.34)$$

$$A = \frac{U^2}{R} t. \quad (3.35)$$

Формулою (3.34) зручно користуватися при послідовному з'єднанні провідників, а формулою (3.35)—при паралельному, оскільки в цьому випадку напруга на всіх провідниках однакова.

Потужністю струму називають величину, яка визначається роботою струму за одиницю часу:

$$P = \frac{A}{t} = IU. \quad (3.36)$$

Одиницею потужності в СІ є ват (Вт).

Закон Джоуля—Ленца. За законом Джоуля-Ленца (англійський вчений Дж.-П. Джоуль (1818—1889) і російський вчений Е. Х. Ленц (1804—1865)) кількість теплоти, що виділяється в провіднику зі струмом, пропорційна силі струму, напрузі і часу проходження струму:

$$Q = IU t = I^2 R t. \quad (3.37)$$

Теплову дію струму широко використовують у сучасній техніці й побуті (електрозварювання, електроосвітлення, електронагрівання).

§ 4. Електричний струм у рідинах

Електролітична дисоціація. Провідність рідких металів, як і твердих тіл, зумовлена рухом електронів під впливом електричного поля. Під час проходження струму вони хімічно не змінюються. Рідини, в яких електричний струм зумовлений рухом іонів, називаються *електролітами*. Це розчини солей, кислот і лугів у воді. Молекули цих речовин у воді *дисоціюють* — розпадаються на позитивно і негативно заряджені іони. Цей процес називають *електролітичною дисоціацією*. Ступінь дисоціації залежить від діелектричної проникності розчинника, концентрації і температури розчину. При зіткненні іони можуть знову об'єднуватися в нейтральні молекули — *рекомбінувати*. За певних умов настає динамічна рівновага, тобто кількість молекул, що розпадається на іони за якийсь проміжок часу, дорівнює кількості молекул, що утворюється з іонів за цей самий проміжок часу. Іони металів і водню завжди мають позитивний заряд (їх називають катіонами), а іони неметалів (кислотні залишки та групи ОН)—негативний (їх називають аніонами).

Закони електролізу. Вивчаючи явища, що супроводжують проходження струму через електроліти, англійський фізик М. Фарадей (1791—1867) відкрив два основних закони електролізу.

Перший закон Фарадея: маса речовини, що виділилася на будь-якому з електродів, прямо пропорційна кількості електрики, яка пройшла через електроліт:

$$m = k q = k I t, \quad (3.38)$$

де k — електрохімічний еквівалент речовини, який дорівнює масі речовини, що виділилася на електроді під час проходження через електроліт заряду в 1 Кл . У СІ k вимірюють у кг/Кл .

Другий закон Фарадея: електрохімічний еквівалент речовини пропорційний її хімічному еквіваленту $\frac{M}{n}$:

$$k = \frac{1}{F} \times \frac{M}{n}, \quad (3.39)$$

де M —молярна маса;

n —валентність;

F —стала Фарадея, однакова для всіх речовин:

$$F = 9,65 \times 10^7 \text{ Кл/кг} \gg 96500 \text{ Кл/моль}.$$

У СІ хімічний еквівалент вимірюють у кг/моль .

Із (3.38) і (3.39)

$$m = \frac{M q}{F n}. \quad (3.40)$$

Визначивши експериментально число Фарадея і знаючи число Авогадро $N_A = 6,023 \times 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}$, можна обчислити заряд одновалентного іона, що дорівнює заряду електрона або позитрона $e = \frac{F}{N} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Кл}$.

Застосування електролізу. Електроліз використовують у техніці для добування чистих металів, покриття металевим шаром виробів з металів (гальваностегія), електролітичного полірування, виготовлення рельєфних металевих копій (гальванопластика) тощо.

§ 4. Електричний струм у газах

Іонізація. Гази погано проводять електричний струм, тобто є ізоляторами. Це пояснюється тим, що газ складається з нейтральних молекул або атомів. При іонізації гази стають провідниками. Процес іонізації полягає у відриві електронів від молекул газу, внаслідок чого утворюються позитивно заряджені іони. Деякі електрони приєднуються до нейтральних молекул, які стають негативними іонами.

Коефіцієнтом іонізації g називають відношення числа іонів N , що утворились, до числа молекул газу N_0 в даному об'ємі:

$$g = \frac{N}{N_0}. \quad (3.41)$$

Для іонізації атома чи молекули потрібно затратити певну енергію — *енергію іонізації*, величина якої залежить від будови атома чи молекули і тому неоднакова для різних газів. Поряд з іонізацією відбувається зворотний процес — *рекомбінація*, тобто об'єднання іона і електрона в нейтральну молекулу чи атом. Після того як дія іонізатора припиняється, газ перестає проводити струм і знову стає ізолятором.

Іонізація газу може бути зумовлена дією зовнішніх факторів (несамостійний розряд) або відбуватися під дією електричного поля між електродами (самостійний розряд).

Несамостійний розряд. Несамостійний розряд зумовлений іонами, що виникають внаслідок нагрівання, опромінювання (наприклад, рентгенівськими променями, α -частинками) або при введенні їх у газ із зовнішнього джерела. Якщо розряд несамостійний, закон Ома не справджується, тобто в цьому разі не існує пропорційної залежності між силою струму і прикладеною напругою (напруга на електродах, між якими знаходиться іонізований газ). Починаючи з деякої напруги, сила струму залишається сталою, в результаті чого всі заряджені частинки досягають електродів. Такий струм називають *струмом насичення*. Він обмежений кількістю іонів, що утворюються під дією іонізатора.

Самостійний розряд. Починаючи з деякої напруги сила струму через газ внаслідок утворення додаткових іонів може збільшуватися. Під впливом електричного поля електрони, що завжди присутні в газі, набирають великих швидкостей і при співударі з молекулами передають їм свою енергію, іонізуючи їх (так звана ударна іонізація). Електрони та іони, що виникли під час ударної іонізації, також починають рухатися з великими швидкостями і в свою чергу можуть іонізувати нові молекули — починається самостійний розряд, який продовжується і після вимикання зовнішнього іонізатора.

Типи самостійного розряду. Існують такі типи самостійного розряду: тліючий, іскровий, коронний, дуговий.

Тліючий розряд виникає при низьких тисках (кілька десятків паскалів) у трубці з електродами, між якими прикладена різниця потенціалів у кілька сот вольт. Цей вид розряду виникає внаслідок ударної іонізації газу в трубці і додаткового вибивання електронів з катода позитивними іонами. У трубці з тліючим розрядом виділяють: катодний темний простір, однорідне тліюче світіння (позитивний стовп), анодну ділянку. Основний спад потенціалу спостерігається біля катода—так званий катодний спад потенціалу, що є головною ознакою тліючого розряду. Він залежить від природи газу і матеріалу катода. Тліючий розряд використовують у трубках з інертним газом для оформлення реклам, у лампах денного світла, квантових джерелах світла (газових лазерах).

Іскровий розряд. У разі великої напруженості електричного поля (30000 В/см) між електродами (навіть при атмосферному тиску) виникає електрична іскра, що має вигляд дуже яскравої звивистої смужки складної форми. Іскра триває приблизно стотисячну долю секунди і виникає тому, що газ втрачає свої ізолювальні властивості (при напрузі пробою — відбувається лавиноподібна іонізація). Напруженість поля, при якій відбувається іскровий пробій, залежить від виду газу, його тиску і температури. Явище іскрового пробою використовують в іскровому вольтметрі — приладі для вимірювання високих напруг (кілька кіловольт і вище). Блискавка являє собою приклад іскрового розряду в атмосфері.

Коронний розряд. Якщо напруга між електродами для іскрового пробою недостатня, виникає коронний розряд, його можна спостерігати при атмосферному тиску навколо провідників або інших предметів (електродів), якщо біля них сильні неоднорідні електричні поля. При великій напруженості поля біля електродів (проводів) газ іонізується, виникають електронні лавини. Оскільки на деякій відстані від електродів напруженість поля зменшується, лавини припиняються і розряд гасне. Коронний розряд часто виникає навколо проводів високовольтних ліній і призводить до втрат енергії. У техніці коронний розряд використовують для очищення газів від домішок, у лічильниках заряджених частинок.

Дуговий розряд. При іскровому пробіі опір міжелектродного проміжку може стати малим, і тоді виникає дуговий розряд — дуга. Дуга виникає, якщо привести в контакт, а потім поступово розсовувати два вугільних електроди, які перебувають під напругою. Тоді у зоні контакту під час проходження електричного струму виділяється багато тепла (оскільки опір контакту дуже великий), починається термоелектронна емісія, і електрони забезпечують електропровідність міжелектродного проміжку. Сила струму в дузі може досягати кількох сотень ампер при напрузі всього в кілька десятків вольт. Електричну дугу широко використовують під час зварювання металів, для освітлення, в дугових електропечах.

Плазма. Нагрівання газу спричиняє відрив зовнішніх електронів від атомів чи молекул. При цьому газ повністю іонізується. Такий його стан називається плазмою або четвертим станом речовини.

Плазму, що виникає в результаті ударної іонізації, називають *газорозрядною*. Кінетичні енергії електронів та іонів у такій плазмі дуже різняться (оскільки між електронами та іонами немає взаємодії). Газорозрядна плазма — нерівноважний стан речовини.

Високотемпературна плазма може виникати при іонізації внаслідок нагрівання. Для такої плазми характерна дуже висока провідність.

Газорозрядну плазму використовують у магнітогідродинамічних генераторах (МГД-генератори) електроенергії для прямого

перетворювання внутрішньої енергії іонізованого газу в електроенергію.

§ 5. Електричний струм у вакуумі

Катодні та анодні промені. Газовий розряд у трубці з електродами, до яких прикладено напругу, припиняється, якщо тиск зменшити до 0,1 Па. Але починає світитися ділянка трубки, розташована навпроти катода. Це світіння зумовлене катодними променями, тобто потоком електронів, що вибиваються з катода, коли його бомбардують позитивні іони. Для того щоб виникли катодні промені, в трубці повинна бути невелика кількість газу. У разі сильного розрідження позитивні іони (і катодні промені) не виникають. Дуже розріджений газ—добрий ізолятор. Під дією катодних променів багато твердих тіл флуоресціюють, що використовується в катодних осцилографах.

Якщо в катоді трубки зробити отвори, частина позитивних іонів, прискорених електричним полем, пролетить через отвори і за катодом спостерігатиметься слабе світіння. Це так звані анодні промені, їх використовують для отримання позитивних іонів, у мас-спектрометрах, прискорювачах.

Термоелектронна емісія. Так називається явище випускання електронів тілами, нагрітими до високої температури. Електрон вилітає з металу, якщо його енергія достатня, щоб виконати певну роботу—*роботу виходу* — проти сил, що перешкоджають його вильоту:

$$A = e j , \quad (3.42)$$

де j — поверхнева різниця потенціалів (різниця потенціалів між поверхнею металу і вакуумом). Електрон зможе вилетіти, якщо його кінетична енергія буде більша за роботу виходу або дорівнюватиме їй:

$$\frac{1}{2} m V^2 \geq e j , \quad (3.43)$$

де m — маса електрона,

V — його швидкість. Робота виходу різна для різних металів і становить кілька електрон-вольт (для W- 4,5 eV, Pt - 5,3 eV, Fe - 4,4 eV, Na- 2,3 eV). При 20°C дуже мало електронів має енергію, більшу за роботу виходу. Енергія електронів збільшується від: 1) нагрівання (термоелектронна емісія), 2) освітлення (фотоелектронна емісія), 3) бомбардування поверхні тіла потоком заряджених частинок—електронів, іонів (вторинна електронна емісія), 4) дії сильного (напруженістю кілька мільйонів В/см) електричного поля (автоелектронна емісія).

Електронна емісія значно підвищується, якщо метал, наприклад

вольфрамову спіраль, покривають плівкою барію, торію, цезію або їх окислами, тобто речовинами, для яких робота виходу електронів дуже мала.

Явище термоелектронної емісії використовують у таких електронних приладах, як діоди, тріоди, електронно-променеві трубки.

Діод. Найпростішою електронною лампою є діод, який складається з відкачаного до високого вакууму скляного або металевого балона з двома електродами (катодом і анодом), один з яких (катод) підігрівний. В електричному колі з діодом струм проходить тільки тоді, коли катод розігрітий до високої температури, а анод з'єднаний з позитивним полюсом джерела струму. Графік залежності сили струму від прикладеної між анодом і катодом напруги називається *вольтамперною характеристикою* діода. При деякому значенні напруги, що залежить від температури катода, струм досягає максимального значення і далі не змінюється, бо всі електрони попадають на анод. Його називають *струмом насичення* i_s . Вольт-амперна характеристика лампи — нелінійна, і закон Ома в цьому випадку не виконується. З підвищенням температури катода внаслідок збільшення кількості електронів, що вилітають з катода, струм насичення зростає.

Діод пропускає струм тільки в одному напрямі, коли анод з'єднано з позитивним полюсом джерела. Цю властивість діода використовують для випрямлення змінного струму.

Тріод. Електронна лампа з трьома електродами (анод, катод і сітка, розташована між ними) називається *тріодом* (рис.20).

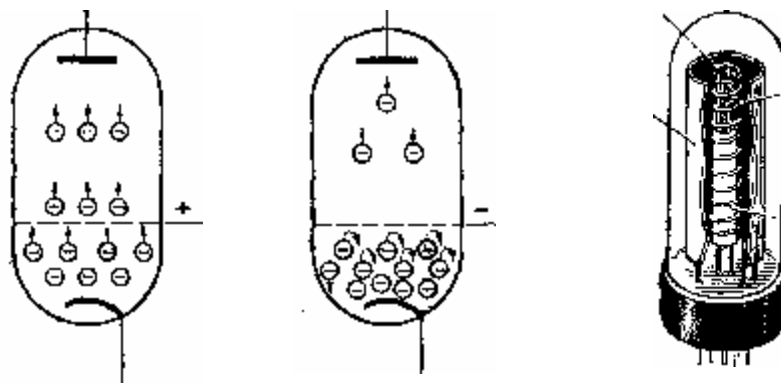


Рис.20

На сітку подають змінний потенціал, який керує рухом електронів від катода до анода. При негативному потенціалі на сітці всі електрони повертаються до катода, струм через лампу не проходить — лампа закрита. Якщо потенціал на сітці позитивний, електрони досягнуть анода, і через лампу йтиме струм. Тріоди також мають нелінійну вольт-амперну характеристику (анодну і сіткову).

Основними параметрами лампи, що визначають її властивості, є коефіцієнт підсилення K , крутість S вольт-амперної характеристики та

внутрішній опір R . Коефіцієнтом підсилення лампи K називають відношення зміни вихідної напруги DU_2 до зміни вхідної DU_1 напруги:

$$K = \frac{DU_2}{DU_1}. \quad (3.44)$$

Крутість S вольт-амперної характеристики лампи визначає приріст анодного струму (мкА) при збільшенні напруги на сітці на 1В.

Розділ IV

ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

§ 1. Магнітне поле струму

Магнітна взаємодія. Магнітне поле. Якщо електричний струм пропускати через провідник, магнітна стрілка, розташована паралельно йому, відхилиться (дослід Ерстеда). Це відхилення зумовлено магнітним полем у просторі навколо провідника зі струмом. Магнітне поле — одна з форм *електромагнітного поля*. Воно матеріальне, має певні властивості, що визначаються експериментально. Магнітне поле виникає навколо рухомих зарядів, тобто при проходженні струму по провідниках, в електролітах, при електричних розрядах, русі наелектризованих тіл, електронів у атомах, коливаннях ядер і т. д. Завжди, коли існує змінне електричне поле, виникає і магнітне поле. Магнітне поле, характеристики якого не змінюються з часом, називають *стаціонарним*.

Для вивчення властивостей магнітного поля користуються замкнутим контуром малих розмірів зі струмом (наприклад, плоскою дрютяною рамкою довільної форми). Експериментально було встановлено, що маленька рамка зі струмом розташовується певним чином у магнітному полі.

У магнітному полі на рамку зі струмом діє момент сил, який повертає її відносно якоїсь нерухомої осі. Величина цього моменту сил залежить від площі поверхні рамки S , сили струму I в ній, розташування рамки і не залежить від її форми:

$$M_{\max} \gg IS. \quad (4.1)$$

Магнітне поле характеризується *вектором магнітної індукції*. За напрям вектора магнітної індукції в місці розташування вільної маленької рамки зі струмом беруть напрям перпендикуляра (нормалі n) до рамки. Останній визначається напрямом руху гвинта (правого гвинта), який потрібно обертати в напрямі струму в рамці. Магнітна стрілка розташовується в магнітному полі рамки зі струмом в напрямі перпендикуляра до неї. Модуль вектора магнітної індукції дорівнює:

$$B = \frac{M_{\max}}{IS}.$$

Ця величина не залежить від властивостей рамки і характеризує магнітне поле в даній точці простору. Одиниця магнітної індукції в СІ називається тесла (Тл): $1\text{Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \times \text{м}}$.

Лінії магнітної індукції. Магнітне поле графічно зображають

лініями магнітної індукції, дотичні до яких збігаються з напрямом вектора магнітної індукції в даній точці. Густина ліній магнітної індукції (кількість ліній, проведених через одиницю площі, перпендикулярної до них) відповідає певному значенню \vec{B} . Лінії магнітної індукції завжди замкнуті на відміну від ліній напруженості електростатичного поля, які починаються і закінчуються на зарядах. Поле, силові лінії якого замкнуті, називають *вихровим*, отже, магнітне поле вихрове. Лініями індукції магнітного поля, що виникає навколо провідника зі струмом, є концентричні кола (рис.21).

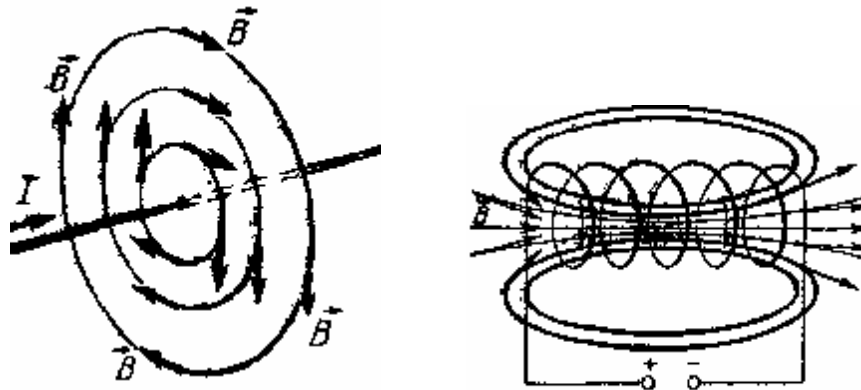


Рис.21

Однорідним магнітним полем називають таке поле, вектори магнітної індукції якого в кожній точці рівні між собою.

Магнітне поле провідників зі струмом. Магнітне поле залежить від сили струму в провіднику і властивостей середовища, в якому знаходиться контур. Величина, що показує, в скільки разів вектор магнітної індукції в однорідному середовищі більший за вектор магнітної індукції у вакуумі, називається магнітною проникністю середовища: $m = \frac{B}{B_0}$

і характеризує магнітні властивості різних середовищ (речовин). Магнітне поле залежить також від форми і розмірів провідників зі струмом. Так, усередині соленоїда (довга циліндрична котушка, на яку по спіралі намотано провід) магнітне поле однорідне, а вектор магнітної індукції напрямлений паралельно осі соленоїда. Поза соленоїдом магнітне поле не відрізняється від поля прямого магніту (як за формою ліній магнітної індукції, так і за розподілом), але біля його кінців лінії викривляються. У соленоїді зі струмом можна виділити нейтральну область і північний та південний полюси.

Індукція магнітного поля в соленоїді, діаметр якого значно менший за довжину:

$$B = \mu_0 n I , \quad (4.2)$$

де I — сила струму, що тече по соленоїду,

n — кількість витків на одиницю довжини соленоїда,

$$m_0 = \frac{1}{e_0 c^2} = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \text{ — магнітна стала.}$$

Індукція магнітного поля нескінченного прямолінійного провідника зі струмом на відстані r від провідника:

$$B = \frac{\mu_0 m I}{2\pi r} . \quad (4.3)$$

Індукцію магнітного поля навколо елемента струму IDl провідника довільної форми в будь-якій точці на відстані r від цього елемента визначають за законом Біо-Савара-Лапласа

$$dB = \frac{\mu_0 m I \sin \alpha}{4\pi r^2} dl , \quad (4.4)$$

де α - кут між напрямками елемента струму IDl і радіуса-вектора \vec{r} даної точки.

Щоб знайти повний вектор магнітної індукції, треба знайти векторну суму елементарних векторів магнітної індукції \vec{B}_i :

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i . \quad (4.5)$$

Дія магнітного поля на провідник зі струмом. На прямолінійний провідник зі струмом у магнітному полі діє сила, перпендикулярна до напрямку струму і вектора магнітної індукції \vec{B} . Якщо провідник розташовано в напрямі вектора магнітної індукції, ця сила дорівнює нулю. Сила, що діє на провідник із струмом, не є центральною, тобто не напрямлена вздовж лінії, що з'єднує центри взаємодіючих тіл.

Згідно із законом Ампера в магнітному полі з індукцією \vec{B} на відрізок прямолінійного провідника Dl зі струмом діє сила, модуль якої

$$F = BIl \sin \alpha , \quad (4.6)$$

де α — кут між провідником і напрямом вектора магнітної індукції. Напрямок сили \vec{F} визначають за допомогою правила лівої руки: якщо розташувати ліву руку так, щоб силові лінії поля входили в долоню, а витягнуті пальці були напрямлені вздовж напрямку струму, то відігнутий на 90° великий палець покаже напрям сили, що діє на відрізок провідника (рис.22).

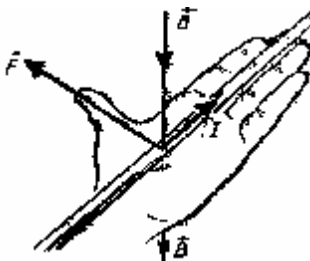


Рис.22

Між двома провідниками, розміщеними на відстані r , діє сила притягання або відштовхування F (рис.23):

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2 l}{r}, \quad (4.7)$$

де l — довжина кожного провідника;

I_1, I_2 — сила струму в них.

За цією формулою визначено основну одиницю сили струму в СІ — ампер.

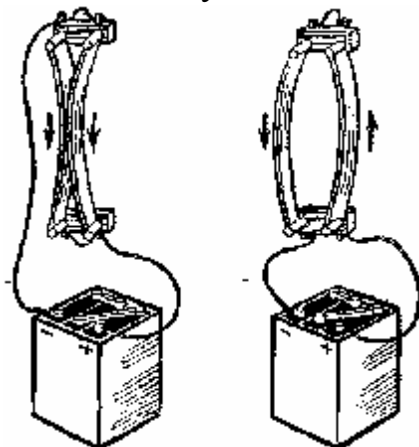


Рис.23

Сила Лоренца. Оскільки електричний струм зумовлений рухом електричних зарядів, то дія магнітного поля на провідник зі струмом є наслідком дії цього поля на всі заряди, що рухаються в провіднику. На заряд q , що рухається зі швидкістю \vec{V} , напрямленою під кутом a до вектора магнітної індукції \vec{B} , діє сила Лоренца, модуль якої:

$$F = qV B \sin a, \quad (4.8)$$

де a - кут між вектором швидкості \vec{V} і вектором магнітної індукції \vec{B} магнітного поля.

Напрямок сили Лоренца визначають за правилом лівої руки: якщо ліву руку розташувати так, щоб складова вектора магнітної індукції \vec{B} , перпендикулярна до швидкості заряду, входила в долоню, а пальці показували напрям руху позитивного заряду, то відігнутий на 90° великий палець покаже напрям діючої сили. Через те що сила Лоренца напрямлена перпендикулярно до напрямку швидкості, вона не виконує роботу (рис.24).

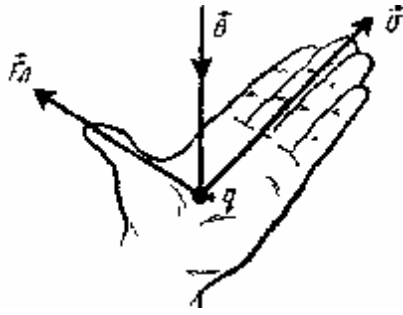


Рис.24

Рух заряджених частинок у магнітному полі. На частинку, заряд якої q , коли вона влітає в однорідне магнітне поле \vec{B} зі швидкістю \vec{V} перпендикулярно до силових ліній, діє сила Лоренца \vec{F}_L , перпендикулярна до \vec{V} і \vec{B} . Сила \vec{F}_L перпендикулярна до напрямку руху, тому вона не виконує роботи і кінетична енергія частинки, а отже, і модуль її швидкості, залишаються сталими. При незмінних \vec{v} і \vec{B} модуль сили Лоренца також сталий через те, що $\vec{F} \perp \vec{V}$, сила Лоренца \vec{F}_L зумовлює доцентрове прискорення, стале за модулем. Отже, заряджена частинка, що влетіла в однорідне магнітне поле перпендикулярно до його силових ліній, рівномірно рухається по колу, площина якого перпендикулярна до вектора магнітної індукції.

$$\text{За другим законом Ньютона } \frac{mV^2}{R} = qVB,$$

де R — радіус кола;

m — маса частинки.

Звідси, радіус обертання зарядженої частинки:

$$R = \frac{mV}{qB}. \quad (4.9)$$

Період обертання зарядженої частинки по колу:

$$T = \frac{2\pi R}{V} = \frac{2\pi m}{qB} = \frac{2\pi m_0}{qB \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}, \quad (4.10)$$

де m_0 — маса спокою;

c — швидкість світла.

При $V \ll c$ період обертання частинки не залежить від її швидкості і радіуса траєкторії.

Негативні і позитивні заряди з однаковою масою та швидкістю рухаються в магнітному полі по однакових траєкторіях, але в різні

сторони, оскільки напрям сили Лоренца залежить від знака заряду. Таким чином, за напрямом повороту частинки в магнітному полі визначають знак її заряду. Так було відкрито позитрон (частинка, що має однакову з електроном масу, але позитивний одиничний заряд) за треком у камері Вільсона.

Залежність радіуса кривизни траєкторії частинки від її маси використовують у *мас-спектрографах* — приладах, які розділяють частинки за їх масами (при однакових зарядах).

Незалежність періоду обертання частинки в магнітному полі від радіуса траєкторії використовується в *циклотронах* — установках для прискорення заряджених частинок протягом кількох циклів до значних енергій за допомогою електричного поля.

Відхилення заряджених частинок у магнітному полі використано також у МГД-генераторах, де при пропусканні іонізованого газу з великою швидкістю через сильне магнітне поле виникає електричний струм, напрямлений перпендикулярно до напрямку руху газу і лінії індукції магнітного поля. Струм відводять за допомогою спеціальних електродів.

Потік магнітної індукції (магнітний потік) Φ , що пронизує плоску поверхню площею S в магнітному полі, це скалярна величина, яка дорівнює добутку модуля вектора магнітної індукції \vec{B} на площу S і косинус кута між векторами \vec{B} і \vec{n} (нормаллю до поверхні) (рис.25):

$$\Phi = BS \cos a. \quad (4.11)$$

$B \cos a = B_n$ — проекція вектора магнітної індукції на нормаль до площини плоского замкнутого провідника (контуру), вміщеного в однорідне магнітне поле. Напрямок нормалі визначається напрямом струму в контурі. За додатний напрям її вибирають такий, що збігається з напрямом переміщення гвинта з правою нарізкою під час обертання його в напрямі струму.

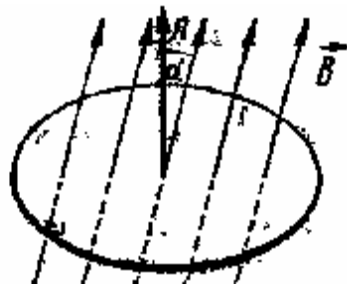


Рис.25

У СІ одиницею магнітного потоку є вебер (Вб).

Робота переміщення провідника зі струмом у магнітному полі. Коли провідник зі струмом переміщується під дією сил магнітного поля, виконується робота, що дорівнює добутку сили струму на зміну магнітного потоку:

$$A = I(\Phi_2 - \Phi_1) = I\Delta\Phi. \quad (4.12)$$

§ 2. Електромагнітна індукція

Явище електромагнітної індукції. Між змінними електричним і магнітним полями існує тісний зв'язок: електричне поле породжує магнітне і, навпаки, магнітне поле породжує електричне. Явище *електромагнітної індукції* відкрив в 1831 р. М. Фарадей (рис.26). Воно полягає в тому, що в замкнутому провідному контурі виникає електричний струм при зміні магнітного потоку через цей контур.

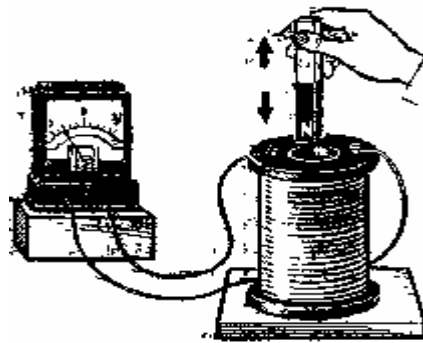


Рис.26

Індукційний струм виникає в разі відносного руху котушки та магніту, зміни магнітного потоку через контур або зміни положення контуру в постійному магнітному полі, рівномірного прямолінійного руху контуру паралельно самому собі в будь-якому напрямі (перпендикулярно або під кутом до ліній магнітної індукції в неоднорідному полі), крім випадку, коли поверхня контуру паралельна магнітному потоку. Якщо магнітне поле однорідне, струм у провідному контурі, що не перетинає ліній магнітної індукції і рухається рівномірно, не індукується.

Правило Ленца. Напрямок індукційного струму знаходять за допомогою правила Ленца. *Індукційний струм завжди має такий напрям, при якому створюване ним магнітне поле перешкоджає зміні магнітного поля, що спричиняє виникнення цього струму.* Це правило виражає закон збереження енергії для електромагнітних явищ: під час руху замкнутого контуру в магнітному полі зовнішні сили виконують певну роботу проти сил, які виникають внаслідок взаємодії індукційного струму з магнітним полем і напрямлених у протилежну до напрямку руху сторону.

Закон електромагнітної індукції. *Сила індукційного струму, що виникає в контурі, пропорційна швидкості зміни магнітного потоку через площу, обмежену контуром:*

$$I_i \sim \frac{D\Phi}{Dt}, \quad (4.13)$$

де $D\Phi$ — зміна магнітного потоку за час Dt . Поява індукційного струму в контурі зумовлена електрорушійною силою індукції E_i . Згідно із законом

Ома для замкнутого кола $I_i = \frac{E_i}{R}$.

Отже, ЕРС індукції пропорційна зміні магнітного потоку. У двох однакових за розміром і формою контурах, виготовлених з різних матеріалів, ЕРС однакова, а індукційний струм різний, більший у тому контурі, опір якого менший.

За законом електромагнітної індукції ЕРС індукції в замкнутому контурі дорівнює швидкості зміни потоку магнітної індукції через площу, обмежену контуром, із знаком мінус:

$$E_i = - \frac{D\Phi}{Dt} . \quad (4.14)$$

У котушці, що має n витків, ЕРС в n раз більша:

$$E_i = - n \frac{D\Phi}{Dt} . \quad (4.15)$$

Знак мінус за правилом Ленца означає, що зі збільшенням магнітного потоку через контур $\frac{dD\Phi}{dt} > 0$ з'явиться така ЕРС індукції, при якій магнітне поле струму, зумовленого нею, протидіятиме магнітному потоку, що привів до її появи. При зменшенні потоку $\frac{dD\Phi}{dt} < 0$ ЕРС індукції збуджує індукційний струм такого напрямку, що його магнітне поле підтримуватиме магнітний потік. При нерівномірній зміні магнітного потоку формула (4.14) відповідає середньому значенню ЕРС. Напрямок індукційного струму можна визначити за допомогою правила правої руки, що випливає з правила Ленца: якщо в долоню правої руки входять магнітні силові лінії, а відігнутий на 90° великий палець буде показувати напрям руху провідника, то витягнуті пальці покажуть напрям струму (і ЕРС індукції).

За формулою (4.14) встановлено одиницю магнітного потоку в СІ вебер (Вб) — такий магнітний потік, в результаті рівномірного зменшення якого до нуля за 1с в замкнутому контурі виникає ЕРС індукції, що дорівнює 1 В, тобто $1\text{Вб} = 1\text{В} \times 1\text{с}$.

Оскільки $B = \Phi / S$, коли $B \perp S$, магнітний потік 1 Вб через площу 1 м^2 створюється магнітною індукцією 1 Тл, тобто $1\text{ Тл} = 1\text{ Вб}/\text{м}^2$.

Вихрове електричне поле. Зміна магнітного поля супроводжується виникненням змінного електричного поля, не зв'язаного з електричними зарядами. Лінії напруженості такого поля ніде не починаються і не закінчуються, вони замкнуті, як і лінії індукції магнітного поля. Таке електричне поле називають *вихровим*. Робота вихрового поля на замкнутому шляху не дорівнює нулю (тобто воно не

потенціальне). ЕРС індукції в нерухомому провіднику дорівнює роботі, яку виконує вихрове електричне поле під час переміщення одиничного позитивного заряду на замкнутому шляху.

ЕРС індукції в рухомих провідниках. Провідник довжиною l , що рухається зі швидкістю \dot{V} перпендикулярно до ліній однорідного магнітного поля з індукцією \dot{B} за час Dt переміщується на відстань $V Dt$. Потік магнітної індукції $D\Phi$ через площу $DS = -lV Dt$:

$$D\Phi = BS \sin a = -BlV Dt \sin a$$

Тому ЕРС індукції, що виникає в провіднику, який рухається:

$$E_i = - \frac{D\Phi}{Dt} = B V l \sin a . \quad (4.16)$$

Самоіндукція. Коли змінний струм проходить через контур, виникає змінний потік магнітної індукції, який пронизує контур. Це приводить до появи ЕРС індукції і додаткового струму. Таке явище називають *самоіндукцією*, а додатковий струм—екстраструмом. За правилом Ленца екстраструм протилежно напрямлений зростаючому і збігається із спадним струмом джерела, ввімкненого в коло.

Індуктивність. Магнітний потік через контури, які мають різні розміри і форму, при заданому струмі неоднаковий. Величина, що дорівнює потоку магнітної індукції через площу поверхні такого контуру, в якому сила струму дорівнює одиниці, називається *коефіцієнтом самоіндукції*, або *індуктивністю* L :

$$L = \frac{\Phi}{I} . \quad (4.17)$$

Індуктивність залежить від форми і розмірів провідника, а також магнітних властивостей середовища, в якому він розташований. Індуктивність довгого соленоїда довжиною l , з кількістю витків на одиницю довжини n і площею поперечного перерізу S дорівнює:

$$L = \mu\mu_0 n^2 S l . \quad (4.18)$$

Вимірюють індуктивність у генрі (Гн): $1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб/А}$. ЕРС самоіндукції:

$$E_{is} = -L \frac{DI}{Dt} . \quad (4.19)$$

Енергія магнітного поля. Енергію струму I , що проходить в замкнутому колі через деякий поперечний переріз провідника з індуктивністю L (енергія магнітного поля, що виникає під час проходження струму I в котушці з індуктивністю L), визначають за формулою:

$$W = \frac{1}{2} LI^2 . \quad (4.20)$$

Розділ V

КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ

§ 1. Механічні коливання

Періодичний рух. Рух, що точно повторюється через певні інтервали часу, називають *періодичним*. Прикладом такого руху є коливання струн музичних інструментів, рух поршня в двигунах внутрішнього згоряння тощо. У періодичному русі можна спостерігати окремі цикли: після закінчення одного починається другий, який точно повторює попередній. Тривалість одного циклу називають *періодом*.

Системи, в яких можна спостерігати періодичний або майже періодичний рух, називають *коливальними*. Різні за природою коливання мають спільні закономірності і описуються однотипними математичними методами. Періодичний рух, що виникає в коливальній системі і продовжується без дії зовнішніх сил, називають *вільним коливанням*. Будь-яка система, в якій можна спостерігати вільні коливання, має стійке положення рівноваги.

Кількість коливань за одиницю часу називають *частотою* коливання. Період T обернено пропорційний частоті n (грецька буква «ню»):

$$T = \frac{1}{n}. \quad (5.1)$$

Одиниця частоти в СІ, що дорівнює одному коливанню за секунду, називається герц (Гц) на честь німецького фізика Г.-Р. Герца (1857—1894).

Тіло, що знаходиться в коливальному русі, може бути закріплене в одній або кількох точках так, що положення цих точок у процесі коливання залишається незмінним. Якщо точка закріплення коливного тіла знаходиться вище за його центр мас, воно називається *маятником*. У положенні рівноваги центр мас маятника перебуває на вертикалі, яка проходить через точку закріплення. Приклад найпростішого маятника, що може колитися під впливом сили тяжіння,—кулька на нитці.

Математичний маятник. Закони руху маятника встановлено на простій моделі: матеріальна точка масою m підвішена на нерозтяжній невагомій нитці. Цю модель називають *математичним маятником*. Маленька кулька на довгій міцній нитці, якщо розміри кульки значно менші від довжини нитки, коливається так само, як і математичний маятник. На цю кульку, коли її виведено з положення рівноваги, діють дві сили: сила тяжіння $m\vec{g}$, де \vec{g} —прискорення вільного падіння, спрямована вертикально вниз, і сила пружності нитки \vec{F} , напрямлена вздовж нитки (рис.27).

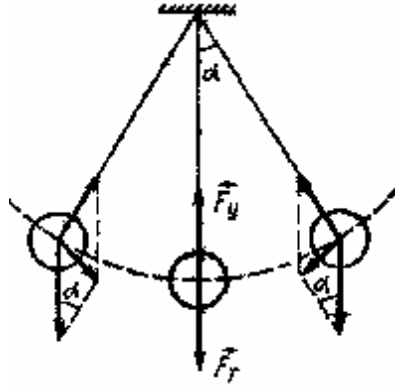


Рис.27

Порівняно з цими силами сили опору повітря та опору гнучкості нитки малі і ними можна знехтувати. Нормальна складова сили тяжіння $m\vec{g}_n$, напрямлена вздовж нитки, і сила пружності нитки надають маятнику доцентрового прискорення, напрямленого до центра дуги кола, вздовж якого рухається кулька. Ці сили не змінюють швидкості маятника за модулем, і їх робота дорівнює нулю. Під дією цих сил напрям вектора швидкості неперервно змінюється так, що в будь-який момент швидкість напрямлена по дотичній до траєкторії руху матеріальної точки. Тангенціальна складова сили тяжіння $m\vec{g}_t$ неперервно змінює модуль швидкості руху матеріальної точки, тобто надає їй тангенціального прискорення a_T .

$$a_T = -\frac{g}{l}s, \quad (5.2)$$

де l — довжина маятника;

s — зміщення маятника від положення рівноваги.

Прискорення прямо пропорційне зміщенню, узятому з протилежним знаком. Періодичні коливання, що виникають під дією сил, пропорційних зміщенню від положення рівноваги, називають *гармонічними коливаннями*. У гармонічному коливальному русі прискорення з часом змінюється, бо змінюється сила, що діє на коливне тіло. Математичний маятник здійснює гармонічні коливання.

Рівняння руху тіла, що коливається під дією сили пружності. Причиною коливань, що виникають в пружному тілі, є сили пружності, які повертають усі елементи цього тіла в положення рівноваги. Сила пружності F за законом Гука пропорційна деформації і напрямлена в бік, протилежний зміщенню з положення рівноваги x :

$$F = -kx, \quad (5.3)$$

де k — коефіцієнт жорсткості пружного тіла.

Проекція прискорення елементів пружного тіла в напрямі осі

$$a_x = -\frac{k}{m}x. \quad (5.4)$$

Оскільки a_x прямо пропорційне зміщенню з положення рівноваги x , то коливання тіла під дією сили пружності гармонічні. Прикладом коливань під дією сили пружності є коливання кульки, підвішеної до пружини.

Рівняння гармонічних коливань. У гармонічних коливаннях зміщення x змінюється з часом за законом синуса або косинуса:

$$x = x_m \sin(\omega t + j_0), \quad (5.5)$$

де x_m — *амплітуда коливань* — найбільше зміщення тіла від положення рівноваги. Величина

$$j = \omega t + j_0 \quad (5.6)$$

визначає стан коливання системи в будь-який момент часу t , називається *фазою* коливань. У початковий момент, коли $t=0$, величина j дорівнює початковій фазі j_0 . Додатну сталу величину ω називають *циклічною або коловою частотою*.

Оскільки прискорення — це друга похідна координати за часом $a_x = \frac{d^2x}{dt^2}$, то згідно з формулою (5.4)

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k}{m}x. \quad (5.7)$$

Формула (5.5) описує розв'язок рівняння (5.7). Справді, перша похідна, що дорівнює швидкості руху під час гармонічних коливань:

$$\frac{dx}{dt} = V = x_m \omega \cos(\omega t + j_0) \quad (5.8)$$

і друга похідна, що дорівнює прискоренню під час гармонічних коливань:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = a = -x_m \omega^2 \sin(\omega t + j_0) = -\omega^2 x. \quad (5.9)$$

З (5.7) і (5.9)

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5.10)$$

Період гармонічних коливань T визначається часом, коли рух повторюється і синус набуває попереднього значення. Оскільки найменший період синуса дорівнює 2π , то $\omega T = 2\pi$, тобто

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi n, \quad (5.11)$$

де n — частота коливань. З формул (5.11) і (5.10)

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (5.12)$$

Період пружних коливань тим менший, чим більша пружність системи, і тим більший, чим більша маса тіла, що коливається. Період коливань математичного маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (5.13)$$

не залежить від маси і амплітуди коливань (*ізохронність*).

Перетворення енергії в гармонічних коливаннях. Повна механічна енергія E коливного тіла — величина стала і дорівнює сумі його кінетичної і потенціальної енергій:

$$E = K + \Pi = \frac{mV_x^2}{2} + \frac{kx^2}{2}. \quad (5.14)$$

Під час коливального руху кінетична енергія тіла змінюється від найбільшого значення, яке вона має в момент проходження положення рівноваги, до нуля в крайніх точках, коли зміщення x досягає максимального значення x_m . Потенціальна енергія, навпаки, має максимальне значення при $x = x_m$ і дорівнює нулю в положенні рівноваги. Оскільки повна механічна енергія залишається сталою в будь-який момент часу, то під час коливань потенціальна енергія періодично перетворюється в кінетичну і навпаки. Величина E дорівнює максимальному значенню потенціальної енергії Π_b , а також максимальному значенню кінетичної енергії K_m , тобто

$$\frac{mV_m^2}{2} = \frac{kx_m^2}{2}. \quad (5.15)$$

Звідси

$$V_m = \sqrt{\frac{k}{m}} x_m, \quad V_m = \omega x_m. \quad (5.16)$$

Енергія коливного тіла, яке гармонічно коливається, прямо пропорційна квадрату амплітуди (або квадрату максимального значення швидкості).

Згасаючі коливання. У реальних коливальних системах за рахунок зміни енергії коливального руху виконується робота проти сил тертя й опору. Тому з часом амплітуда вільних коливань зменшується. Коли ж запас енергії вичерпується, коливання припиняються.

Коливання, амплітуда яких з часом зменшується, називають *загасаючими*. Практично всі вільні коливання — загасаючі і тому вони не гармонічні. Проте, якщо сили тертя набагато менші за сили пружності, наближено можна затухаючі коливання вважати гармонічними з певним

періодом T_0 .

Вимушені коливання. Незагасаючі коливання, які підтримують за допомогою зовнішньої періодично діючої сили $F(t)$, називають *вимушеними*. Якщо сила $F(t)$ змінюється за законом гармонічних коливань, то зумовлені нею вимушені коливання — гармонічні. Точніше, спочатку виникають складніші коливання, що є результатом накладання вільних і вимушених коливань, але з часом вільні коливання припиняються, а вимушені набувають гармонічного характеру. Частота встановлених вимушених коливань дорівнює частоті дії зовнішньої сили.

Явище резонансу. Із зміною частоти w зовнішньої сили змінюється амплітуда вимушених коливань. Якщо частота наближається до частоти вільних коливань системи, то амплітуда вимушених коливань збільшується, досягаючи максимуму, коли $w = w_0$. Зі збільшенням частоти $w > w_0$ амплітуда вимушених коливань зменшується. Явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань при наближенні частоти дії зовнішньої періодичної сили до частоти вільних коливань системи називають *резонансом* (від латинського слова *resonans*—той, що відгукується). Графік залежності амплітуди коливань від частоти називають резонансною кривою.

Автоколивання. Незагасаючі коливання, які підтримуються в системі без впливу на неї зовнішніх періодичних сил, а тільки за рахунок енергії самої системи, називають *автоколиваннями*. На відміну від вимушених коливань частота і амплітуда автоколивань визначаються властивостями самої системи, їх амплітуда не залежить від величини початкової дії збуджувального поштовху, як це характерно для вільних коливань. Прикладом автоколивальної системи є годинник з маятником або заводною пружиною.

§ 2. Електромагнітні коливання

Вільні і вимушені електромагнітні коливання. *Вільними* називаються електромагнітні коливання, які відбуваються без впливу зовнішньої періодичної електричної сили. Такі коливання виникають в електричному колі, що складається з конденсатора і котушки індуктивності, в так званому *коливальному контурі*, якщо зарядити конденсатор. При його розрядженні в колі проходить струм, магнітне поле якого спочатку внаслідок самоіндукції перешкоджає цьому, а із зменшенням сили струму підтримує струм такого напрямку, що він знову заряджає конденсатор (його полярність тепер протилежна початковій). Процес знову і знову повторюється. Власні коливання в контурі швидко припиняються, оскільки він має активний опір і тому витрачається енергія

на нагрівання.

В коливальному контурі з джерелом періодично змінної ЕРС відбуваються *вимушені* електромагнітні коливання. Коливання сили струму або ЕРС індукції виникають, наприклад, при обертанні д्रोотної рамки в однорідному магнітному полі. Якщо активний опір у контурі $R = 0$, коливання будуть *незагасаючими*. У цьому разі між коливаннями напруги і сили струму існує різниця фаз, що дорівнює $\pi/2$, тобто при максимальному значенні напруги сила струму дорівнює нулю і, навпаки, максимальному значенню сили струму відповідає напруга, що дорівнює нулю. У коливальному контурі енергія електричного поля конденсатора $\frac{Q_0^2}{2C}$ перетворюється в енергію магнітного поля котушки $\frac{LI^2}{2}$ — і навпаки.

Період вільних коливань. Вільні електромагнітні коливання контуру є гармонічними з періодом:

$$T = 2\pi \sqrt{LC} . \quad (5.17)$$

Цю формулу вивів англійський фізик У. Томсон. Циклічна частота вільних електромагнітних коливань у контурі:

$$w = \sqrt{\frac{1}{LC}} . \quad (5.18)$$

Якщо індуктивність вимірювати в генрі, а ємність у фарадах, період коливань дістанемо в секундах, а частоту в герцах.

Циклічну частоту вільних коливань у контурі з активним опором визначають за допомогою формули:

$$w_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} . \quad (5.19)$$

Коливання значень заряду та струму. Якщо заряд конденсатора з часом змінюється за гармонічним законом:

$$q = q_0 \cos w_0 t , \quad (5.20)$$

то й сила струму в коливальному контурі змінюється за гармонічним законом:

$$I = I_0 \cos(w_0 t + \frac{\pi}{2}) . \quad (5.21)$$

Коливання сили струму зміщені за фазою на $\frac{\pi}{2}$ відносно коливань заряду. Між амплітудним значенням заряду і струму існує співвідношення:

$$I_0 = w_0 q_0 . \quad (5.22)$$

Амплітуду сили струму в контурі визначають за формулою:

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{\frac{L}{C}}}, \quad (5.23)$$

де U_0 — напруга на обкладках конденсатора в момент часу t_0 , а величина $\sqrt{\frac{L}{C}}$ — хвильовий опір коливального контуру.

Під час вільних коливань у контурі відбувається взаємне перетворення енергії електричного поля в енергію магнітного. У разі відсутності втрат повна енергія електричного поля залишається сталою:

$$W = \frac{CU^2}{2} + \frac{LI^2}{2} = \text{const}. \quad (5.24)$$

§ 3. Механічні хвилі. Звук

Хвильові явища. Коливання тіла в пружному середовищі спричинює вимушені коливання частинок речовини, що прилягають до нього. Сили пружності поступово виводять з положень рівноваги віддаленіші частинки речовини, і вони також починають коливатися. Таким чином, коливальний рух поширюється в середовищі з певною швидкістю. Будь-який збурений стан речовини, або поля, що поширюється в просторі з часом, називають *хвилею*. Фізичні причини хвильових рухів можуть бути різними, але всі види хвильових явищ кількісно описуються однаковими або майже однаковими законами.

У газах, рідинах і твердих тілах механічні хвилі виникають внаслідок дії сил пружності. Тіло, що збуджує хвилі, називають джерелом хвиль. Під час поширення хвиль речовина не переноситься, а тільки переміщується коливальний стан речовини. При цьому окремі частинки речовини зміщуються з положень рівноваги лише на відносно невеликі відстані, і кожна з них у середньому залишається на тому самому місці.

Геометричне місце точок середовища, що коливаються в однаковій фазі, називають *хвильовою поверхнею*, або *фронтом хвилі*. Залежно від форми хвильової поверхні хвилі бувають плоскими й сферичними. Лінію, перпендикулярну до хвильової поверхні, називають *променем*. Якщо хвилі сферичні, промені напрямлені вздовж радіусів сфери. В однорідному середовищі промінь є прямою лінією, що збігається з напрямом перенесення енергії хвилі.

Якщо джерело хвиль коливається гармонічно, тобто $x = x_m \cos(\omega t + j_0)$, то рівняння плоскої хвилі, що поширюється з плином часу t вздовж напрямку осі OY , має вигляд:

$$x_{II} = x_M \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} w t - \frac{y}{V} \frac{\partial}{\partial t} + j \right) \quad (5.25)$$

де V — швидкість поширення хвиль.

Величину

$$k = \frac{w}{V} = \frac{2\pi T}{V} = \frac{2\pi}{l} \quad (5.26)$$

називають *хвильовим числом*.

Рівняння сферичної хвилі має вигляд:

$$x_{cf} = \frac{x_{om}}{r} \cos(wt - kr + j_0), \quad (5.27)$$

де x_{om} — амплітуда хвилі в точках середовища, які знаходяться від джерела хвиль на відстані, що дорівнює одиниці довжини.

Поперечні й поздовжні хвилі. Хвилю називають *поперечною*, якщо частинки середовища коливаються в напрямі, перпендикулярному до напрямку поширення хвиль. Поперечна хвиля поширюється в середовищі, в якому зміна форми приводить до появи сил пружності. Наприклад, поперечна хвиля виникає в гумовому шнурі, якому надали коливального руху в напрямі, перпендикулярному до лінії цього шнура. Електромагнітні хвилі також поперечні.

Хвилю називають *поздовжньою*, якщо коливання частинок середовища відбувається вздовж напрямку поширення хвилі. Поздовжні хвилі поширюються в середовищі, в якому зміна об'єму приводить до виникнення пружних сил. Наприклад, у довгій м'якій пружині великого діаметра, якщо на один її кінець вздовж осі пружини діє зовнішня періодична сила, виникають поздовжні хвилі. Поширення звуку в повітрі — це теж приклад поздовжніх хвиль.

У газах й об'ємі рідин внаслідок того, що зміна їх форми не приводить до появи сил пружності, поширення поперечних хвиль неможливе.

Довжина і швидкість хвилі. *Довжиною хвилі l* називають відстань між найближчими вздовж напрямку поширення хвилі точками, що коливаються в однакових фазах. Фронт хвилі зміщується від джерела хвиль з деякою швидкістю V . Відстань, на яку поширюється коливання за один період, дорівнює довжині хвилі. Отже,

$$l = VT. \quad (5.28)$$

або

$$V = \frac{l}{T} = l\nu. \quad (5.29)$$

Швидкість поширення хвиль залежить від пружності середовища і

має різні значення для різних речовин.

У твердих тілах швидкість поздовжніх хвиль більша від швидкості поперечних хвиль. За часом прибуття поздовжньої та поперечної хвиль можна визначити відстань до джерела, в якому раптово виникають ці хвилі. Так, на сейсмічних станціях визначають відстань до центра землетрусу, спостерігаючи запізнення поперечної хвилі, що збуджується під час землетрусу одночасно з поздовжньою.

Енергія хвилі. Джерело хвиль у процесі коливань витрачає енергію. Поширення хвиль приводить до того, що енергія коливального руху передається іншим частинкам середовища. У хвильовому процесі енергія передається без перенесення речовини. Величину, що вимірюється енергією, яка переноситься хвилею за одиницю часу крізь одиницю площі поверхні, перпендикулярної до напрямку поширення хвилі, називають *інтенсивністю* хвилі. Інтенсивність хвилі прямо пропорційна квадрату її амплітуди.

Оскільки частина механічної енергії при поширенні хвиль розсіюється, то зі збільшенням відстані од джерела амплітуда коливань поступово зменшується. Вона зменшується і тоді, коли поширюється сферична хвиля. Це відбувається внаслідок того, що площа поверхні фронту хвилі пропорційна квадрату відстані r від джерела.

Звукові хвилі. Хвилі, що поширюються в пружному середовищі і амплітуда яких не дуже велика, називають звуковими або акустичними. Вуху людини сприймай звукові коливання з частотою від 16 до 20000 Гц (чутні звуки). Звукові хвилі з частотою меншою за 16 Гц, називають *інфразвуковими*, а з частотою, більшою за 20000 Гц,—*ультразвуковими*. Розділ фізики, що вивчає звукові явища, називають *акустиккою*.

Швидкість звуку. Швидкість поширення звуку в різних середовищах залежить від їхніх пружних властивостей. Швидкість звуку в повітрі досить велика (при 0°C вона дорівнює 331 м/с), у газах—приблизно дорівнює середній швидкості теплового руху молекул, тобто пропорційна $T^{1/2}$, де T —абсолютна температура. Так, наприклад, у повітрі швидкість звуку

$$V = 331,3\sqrt{aT} \text{ м/с}, a = \frac{1}{273}. \quad (5.30)$$

У газі V_r тим більша, чим менша маса молекул газу. Наприклад, при 0°C швидкість звуку у вуглекислому газі $V_{\text{CO}_2} = 258 \text{ м/с}$, а у водні $V_{\text{H}_2} = 1270 \text{ м/с}$. У воді швидкість звуку приблизно у 4,25 раза більша, ніж у повітрі. У твердих тілах швидкість звуку ще більша. Наприклад, при 15°C у сталі $V_r = 4980 \text{ м/с}$.

Інтерференція хвиль. Хвилі, що мають однакову частоту, сталу площину коливань і сталу різницю фаз, називаються *когерентними*. У кожній точці простору, де поширюються такі хвилі, відбувається

додавання зміщень, що відповідають окремим коливанням. Результуюче зміщення будь-якої частинки середовища дорівнює векторній сумі зміщень, що створює кожна окрема хвиля.

Явище накладання двох (або кількох) когерентних хвиль, які поширюються в пружному середовищі, називають *інтерференцією*. Внаслідок додавання когерентних хвиль утворюється стійка інтерференційна картина. Амплітуда коливання, що виникає в будь-якій точці у результаті додавання когерентних хвиль, що поширюються від двох джерел O_1 і O_2 (рис.28) залежить від *різниці ходу* хвиль $\Delta d = d_2 - d_1$.

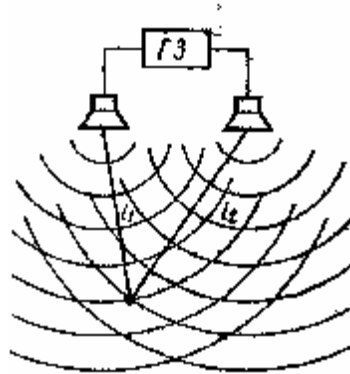


Рис.28

Якщо початкова фаза коливань однакова і різниця ходу двох когерентних хвиль дорівнює цілому числу довжин хвиль, фази коливань обох джерел збігаються і результуюча амплітуда коливань у даній точці буде максимальною. Отже, умова максимуму:

$$\Delta d = k l, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (5.31)$$

Якщо різниця ходу хвиль у певній точці дорівнює непарному числу довжин півхвиль, коливання відбуваються в протифазі і амплітуда коливання в цій точці буде мінімальною. Умова мінімуму:

$$\Delta d = (2k + 1) \frac{l}{2}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (5.32)$$

Виникнення інтерференційної картини призводить до того, що енергія хвиль розподіляється в просторі нерівномірно. У точках максимуму енергія хвиль зростає, а в точках мінімуму — зменшується. Явище інтерференції — характерна властивість хвильового процесу будь-якої природи. Якщо під час вивчення якогось явища спостерігається інтерференція, це означає, що дане явище має хвильову природу.

Принцип Гюйгенса. Голландський вчений Х. Гюйгенс (1629—1695) сформулював загальний принцип, за допомогою якого описують хвильові явища: *кожна частинка середовища, до якої поширилася хвиля, сама стає джерелом елементарних вторинних хвиль*. Отже, поширення хвиль можна розглядати як результат накладання елементарних хвиль, що

приходять з кожної точки, яка перебуває у хвильовому русі. Поверхню, що збігається з дотичною до всіх вторинних хвиль, називають *фронтом хвилі*.

Дифракція хвиль. Огинання хвилями перешкод називають *дифракцією* (від латинського diffractus—розломлений). При цьому спостерігається відхилення від прямолінійного поширення хвиль.

Явище дифракції можна пояснити за допомогою принципу Гюйгенса. Вторинні хвилі, що виникають поблизу краю перешкоди, проникають у геометричну тінь. Для того щоб явище дифракції розглянути детальніше, треба було уточнити принцип Гюйгенса, що й зробив французький вчений О.-Ж. Френель (1788—1827): *амплітуда і фаза хвилі в будь-якій точці простору є результатом інтерференції хвиль, що випромінюються вторинними когерентними джерелами, розміщеними на поверхні фронту хвилі*.

Явище Доплера. Зміну висоти (частоти) звуку, зумовлену відносним рухом джерела звукових хвиль та спостерігача, називають *ефектом Доплера*. Швидкість руху джерела звуку векторно додається до швидкості поширення звукових хвиль. Якщо джерело наближається зі швидкістю V_0 , то частота звуку джерела n_0 , яку сприймає нерухомий спостерігач, дорівнює:

$$n_0 = n \frac{V}{V - V_0}, \quad (5.33)$$

де n — частота коливань;

V — швидкість їх поширення, при цьому $n_0 > n$.

Якщо джерело віддаляється, то

$$n_0 = n \frac{V}{V + V_0} \quad (5.34)$$

і $n_0 < n$. Наприклад, якщо електропоїзд, що подає звуковий сигнал, наближається до платформи, а потім, пройшовши повз неї, віддаляється, то спочатку чути звук високого тону, потім цей звук різко знижується, і звучить сигнал низького тону.

§ 5. Електромагнітні хвилі

Електромагнітне поле. Змінне магнітне поле породжує вихрове електричне поле, і навпаки. Англійський вчений Дж.-К. Максвелл (1831—1879) теоретично обґрунтував нерозривний зв'язок між змінним електричним і магнітним полями, які утворюють одне електромагнітне

поле. Він склав систему рівнянь електромагнітного поля, в яких відображено зв'язок між зарядами і струмами. Змінне електричне поле у вакуумі або діелектрику Максвелл назвав *струмом зміщення*. Введення цього поняття дало змогу розглядати будь-який електричний струм замкнутим (наприклад, струм провідності в коливальному контурі переходить у струм зміщення між обкладками конденсатора). Струмом його було названо тому, що змінне електричне поле як і електричний струм породжує магнітне поле.

Електромагнітні хвилі. Поширення коливань змінного електромагнітного поля називають *електромагнітними хвилями*. Існування електромагнітних хвиль теоретично передбачив Максвелл, а експериментально виявив Г. Герц. Електромагнітні хвилі в середовищі поширюються зі скінченною швидкістю:

$$V = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}, \quad (5.35)$$

де $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \times 10^8 \text{ м/с}$ — швидкість електромагнітних хвиль у вакуумі

(швидкість світла у вакуумі);

ϵ і μ — діелектрична й магнітна проникність середовища.

Оскільки, крім феромагнетиків, майже у всіх матеріалів $\mu \gg 1$, то $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$. Електромагнітні хвилі — поперечні. Вектори \vec{B} і \vec{E} завжди перпендикулярні один до одного і до напрямку поширення хвилі (рис.30).

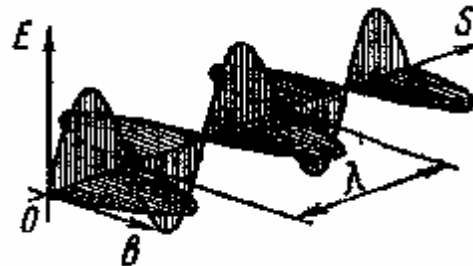


Рис.30

Електромагнітна хвиля характеризується довжиною $l = cT$ і частотою $n = \frac{c}{l}$ (T - період коливань). Вона переносить енергію, яка залежить від напруженості електричного поля \vec{E} і індукції магнітного поля \vec{B} , і має деякий імпульс. Тому вона чинить певний тиск, який пропорційний середньому значенню густини енергії, що переноситься електромагнітними хвилями. Тиск світла виявив російський вчений П. М. Лебедев.

Відкритий коливальний контур. Звичайно коливальний контур

(який можна назвати закритим) не здатний випромінювати електромагнітні хвилі. Щоб контур міг випромінювати, його роблять відкритим. Перехід від замкнутого контуру до відкритого, який називають *електричним вібратором*, або *диполем*, наведено на рис.31. Ємність та індуктивність вібратора дуже малі, тому в контурі виникають коливання з дуже високою частотою. Довжину вібратора вибирають такою, щоб

$$l = \frac{\lambda}{2}. \quad (5.36)$$

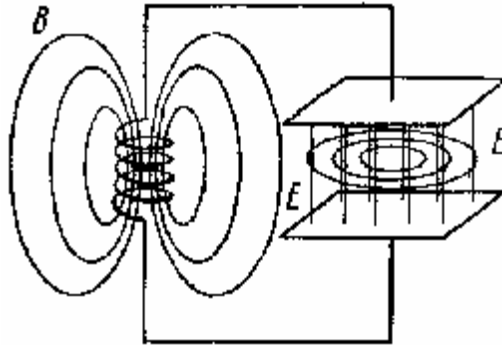


Рис.31

Основна власна частота

$$w = \frac{c}{2l}, \quad (5.37)$$

де c —швидкість поширення електромагнітних коливань. На довжині вібратора укладається дві, три і т.д. півхвилі з частотою в 3 і т. д. рази більшою, ніж основна частота.

Розділ VI. ОПТИКА

§ 1. Природа і властивості світла

Розвиток поглядів на природу світла. Ще в XVII ст. виникли дві теорії, що по-різному описували природу світла. За корпускулярною теорією, прихильником якої був Ньютон, світло — це потік частинок, які рухаються від джерела і при цьому переноситься речовина. За хвильовою теорією, якою керувався Гюйгенс, світло — це поширення хвиль в особливому гіпотетичному середовищі — ефірі. Максвелл і Герц виявили електромагнітну хвильову природу світла. Про хвильові властивості світла свідчать явища інтерференції, дифракції та поляризації. Світло поширюється як хвиля, а випромінюється і поглинається як потік частинок (виявляє квантові властивості). Двоїстість властивостей світла (корпускулярних і хвильових) — важлива фізична характеристика електромагнітного випромінювання. Ці властивості описано в сучасній фізичній теорії — квантовій електродинаміці.

§ 2. Фотометрія

Світловий потік. Людське око може сприймати електромагнітні хвилі довжиною l від 0,38 до 0,76 мкм і найчутливіше до зелених променів ($l \approx 0,556 \text{ мкм}$). Тому іноді в практиці важливо знати інтенсивність світла, що її оцінює безпосередньо око людини. Кількість енергії світла, що проходить через дану поверхню за одиницю часу і оцінюється за зоровим відчуттям, називається *світловим потоком*. Світловий потік Φ прямо пропорційний світловій енергії Φ і обернено пропорційний часу t :

$$\Phi = a \frac{W}{t}, \quad (6.1)$$

де $a \ll 1$ — функція видимості людського ока, яка дорівнює нулю, коли довжина хвиль $a < 0,38 \text{ мкм}$ і $a > 0,76 \text{ мкм}$, і дорівнює одиниці при $a = 0,556 \text{ мкм}$.

Якщо джерело випромінює світло рівномірно в усіх напрямках (*ізотропне джерело*) і має малі розміри, його можна вважати *точковим джерелом*. Прикладом такого джерела можуть бути зірки, якщо їх випромінювання вивчати поблизу Землі.

Розподіл світлового потоку у різних напрямках може бути нерівномірним. Наприклад, у прожекторі, фарі, проекторі світловий потік

сконцентровано вздовж певної осі. За одиницю світлового потоку приймається люмен (лм) — світловий потік, що рівномірно випромінюється джерелом, сила світла якого 1кд , у тілесний кут, що дорівнює одному стерadianу (ср).

Сила світла. Величину, що вимірюється світловим потоком, який випромінюється в одиниці тілесного кута, називають *силою світла*. Якщо джерело випромінює світловий потік Φ у тілесний кут W сила світла I дорівнює:

$$I = \frac{\Phi}{W}. \quad (6.2)$$

Сила світла, точкового джерела, оскільки повний тілесний кут має 4π стерadianів, дорівнює:

$$I_n = \frac{\Phi}{4\pi}. \quad (6.3)$$

За одиницю сили світла прийнято міжнародну свічку—канделу (кд).

Освітленість. Величину, яка вимірюється відношенням світлового потоку Φ , що падає на поверхню площею S до цієї площі, називають *освітленістю E* :

$$E = \frac{\Phi}{S}. \quad (6.4)$$

За одиницю освітленості в СІ прийнято люкс (лк), що дорівнює освітленості поверхні площею 1 м^2 рівномірним світловим потоком 1 лм . Освітленість поверхні точковим джерелом прямо пропорційна силі світла джерела, косинусу кута падіння променів і обернено пропорційна квадрату відстані від джерела до поверхні:

$$E = \frac{I}{R^2} \cos \alpha. \quad (6.5)$$

Освітленість, створена кількома джерелами, дорівнює сумі освітленостей від кожного джерела зокрема.

§ 3. Геометрична оптика

Прямолінійне поширення світла. Якщо середовище однорідне, світло в ньому поширюється прямолінійно. Здебільшого уява про прямолінійне поширення світла дає змогу правильно описувати оптичні явища. Відповідний розділ оптики називається *геометричною оптикою*. Однак у деяких фізичних процесах виявляється хвильова природа світла і спостерігаються явища інтерференції та дифракції. Вивченню цих явищ

присвячено інший розділ—фізична оптика. Відхилення від прямолінійності відбуваються тоді, коли світло проходить через вузький отвір, діаметром d або коли спостереження ведуть на великих відстанях L від екрана. Умова застосування геометричної оптики для світлової хвилі з довжиною l є:

$$d \gg \sqrt{lL}. \quad (6.6)$$

У геометричній оптиці приймається, що світлові промені не змінюються, коли вони перехрещуються.

Прямолінійністю поширення світла пояснюється утворення тіні від предметів, освітлених майже точковим джерелом випромінювання.

Закон відбиття світла. Більшість тіл лише відбивають електромагнітні хвилі, що падають на їхню поверхню. Освітлені предмети можна бачити з усіх боків, бо вони дифузно розсіюють світло в різні боки. Тіла, що мають гладку поверхню, відбивають світло в одному напрямі. Таке напрямлене відбивання називають *дзеркальним*, а відбиваючі поверхні—*дзеркалами*. Закон дзеркального відбиття світла: *відбитий промінь завжди лежить в одній площині з падаючим променем і перпендикуляром до межі двох середовищ у точці падіння променя. Кут відбиття γ дорівнює куту падіння α* (рис.32). При відбиванні світла спостерігається оборотність ходу променів: промінь, що поширюється в зворотному напрямі, збігається з первинним променем.

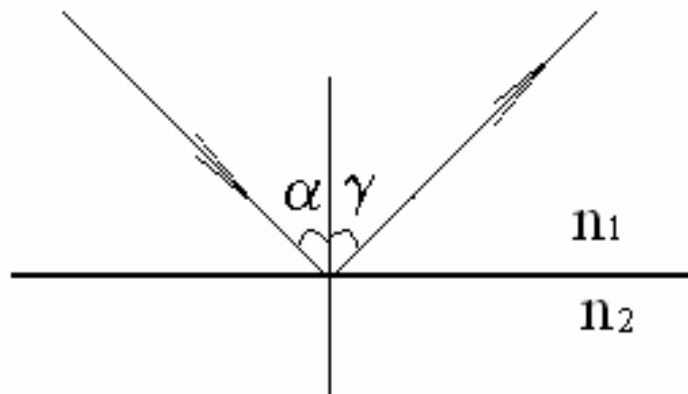


Рис.32

Закон заломлення світла. Якщо середовище, на межу якого падає світло, прозоре, частина світла за певних умов може пройти цю межу. При цьому промінь, як правило, змінює напрям свого поширення. *Заломлений промінь завжди лежить в одній площині з падаючим променем і поставленим у точці падіння перпендикуляром до межі двох середовищ. Відношення синуса кута падіння a до синуса кута заломлення b —*

величина стала для даних двох середовищ (рис.33):

$$\frac{\sin a}{\sin b} = n_{21}. \quad (6.7)$$

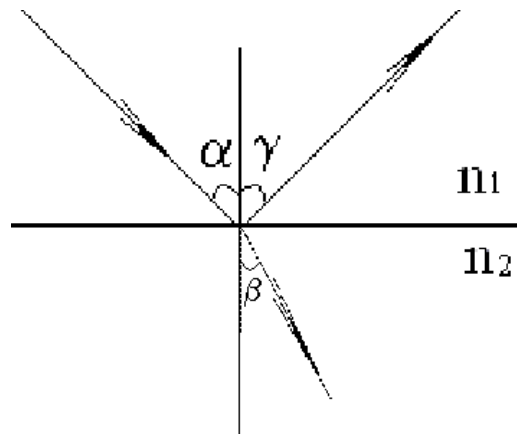


Рис.33

Величину n_{21} називають *відносним показником заломлення* або показником заломлення другого середовища відносно першого. *Абсолютним показником заломлення* даного середовища називають його показник заломлення відносно вакууму. Якщо абсолютний показник заломлення одного середовища дорівнює n_1 , а другого n_2 , то відносний показник заломлення першого середовища відносно другого буде:

$$n_{12} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (6.8)$$

Аналогічно, відносний показник заломлення другою середовища відносно першого

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (6.9)$$

Отже,

$$n_{21} = \frac{1}{n_{12}}. \quad (6.10)$$

Середовище з меншим абсолютним показником заломлення називають оптично менш густим середовищем. Показник заломлення залежить від довжини хвилі світла $n = n(l)$. Абсолютний показник твердої або рідкої речовини дуже мало відрізняється від показника заломлення тієї самої речовини відносно повітря.

Повне відбиття. Дослід показує, що в процесі переходу променів в оптично густіше середовище зі збільшенням кута падіння інтенсивність

заломленого світла зменшується, а відбитого — збільшується. Коли падаючий промінь близький до ковзного, відбивається все світло (наприклад, від води або скла) на межі розділу. Якщо світло переходить з оптично більш густішого середовища в оптично менш густе, то, починаючи з деякого кута падіння a_0 (для будь-якого $a \geq a_0$), світло повністю відбивається від поверхні розділу цих двох середовищ (рис.34). Кут падіння a , що відповідає куту заломлення $b_0 = 90^\circ$, називають *граничним кутом повного відбиття*. З формули (6.7) в цьому випадку $\sin b_0 = 1$, отже,

$$\sin a_0 = \frac{1}{n_{12}}. \quad (6.11)$$

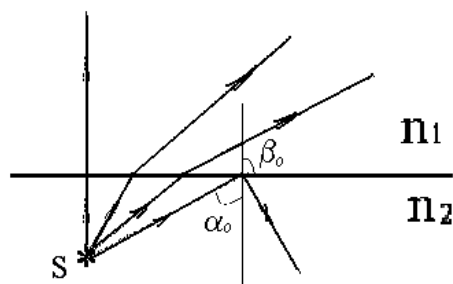


Рис.34

Наприклад, для води $a_0 = 48^\circ 35'$; для скла $a_0 = 41^\circ 50'$; для алмазу $a_0 = 24^\circ 40'$. Явище повного відбиття використовують, наприклад, у прозорих гнучких волокнах— *світловодах*, за допомогою яких світло може поширюватися криволінійно.

Тонкі лінзи. Сферичною лінзою називають прозоре тіло, обмежене двома сферичними поверхнями, причому одна з них може бути плоскою. Пряма, що проходить через центри цих сферичних поверхонь, називається *головною оптичною віссю лінзи*. Коли один бік лінзи плоский, головна оптична вісь її перпендикулярна до цієї площини й проходить через центр сферичної поверхні. Лінзи, товщина яких на краях менша, ніж на середині, називають *збиральними* (рис.35). Кожну з них можна уявити як сукупність скляних призм, з напрямленими до країв цієї лінзи вершинами заломних кутів. Оскільки кожна призма в повітрі відхиляє всі промені до основи, то *будь-які промені, проходячи збиральну лінзу, відхиляються в бік її головної осі*.

Лінзи, краї яких товщі за середину, називаються *розсіювальними*. Відхилення променів, що пройшли крізь розсіювальну лінзу, спостерігається в бік від головної оптичної осі. Коли товщина лінзи мала порівняно з радіусами кривизни поверхонь і відстанню предмета від лінзи, її називають *тонкою лінзою*. Вершини сегментів у тонкій лінзі розмішені на дуже малій відстані одна від одної, тому їх вважають однією точкою і

називають її *оптичним центром* лінзи.

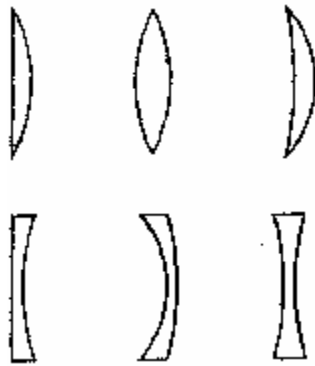


Рис.35

Головна оптична вісь проходить через оптичний центр лінзи. Будь-яку іншу пряму, що проходить через оптичний центр лінзи, називають *побічною оптичною віссю*.

Зображення в тонкій лінзі. Промені, які виходять з будь-якої точки, що світиться, після заломлення в збиральній лінзі перетинаються в одній точці, яку називають зображенням першої. Після проходження через розсіювальну лінзу промені розходяться, а їх продовження перетинаються. Точка перетину в цьому разі знаходиться з того самого боку, що й точка, яка світиться. Таке зображення називають *уявним*.

Якщо промені падають паралельно головній оптичній осі, то після заломлення в збиральній лінзі вони перетинаються в певній точці, яку називають *головним фокусом* лінзи. Лінза має два головних фокуси, які в однорідному середовищі розміщені на однаковій відстані від оптичного центра лінзи по обидва її боки. Цю відстань називають *фокусною*. Промені, паралельні побічній оптичній осі, після проходження лінзи теж збираються в одній точці, яка розміщена на фокальній площині, остання перпендикулярна до головної оптичної осі і проходить через відповідний головний фокус.

Якщо світна точка знаходиться у фокусі лінзи або будь-якій точці фокальної площини, то внаслідок зворотності ходу променів усі вони після проходження лінзи будуть паралельні відповідній оптичній осі. Якщо точку, що світиться, помістити від збиральної лінзи на відстані, меншій, ніж її фокусна відстань, то після заломлення дістанемо промені, які розходяться й дають уявне зображення. Якщо предмет міститься від збиральної лінзи далі, ніж її фокус, то промені за лінзою збігатимуться і зображення буде *дійсне*. Оскільки властивість тонкої лінзи визначають переважно положенням її фокусів і практично воно не залежить від ходу променів у самій лінзі, тонку лінзу схематично зображують, як показано на рис.36.

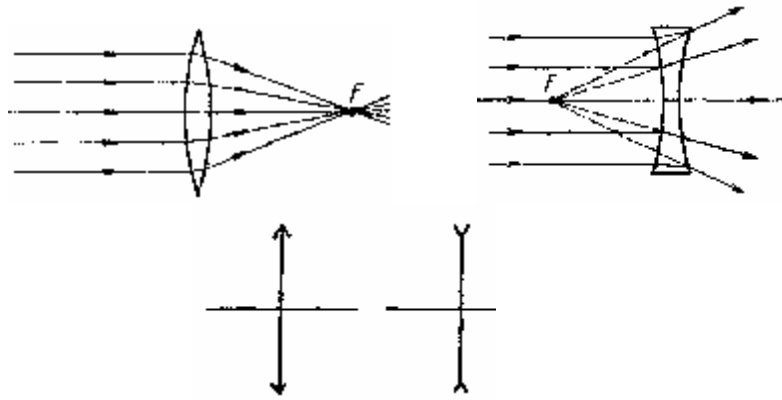


Рис.36

Щоб побудувати зображення предмета в тонкій лінзі, зручно користуватися трьома видами променів, які: 1) паралельні головній оптичній осі й після проходження лінзи збираються в її фокусі; 2) проходять через фокус лінзи й після заломлення паралельні головній оптичній осі; 3) проходять через оптичний центр лінзи й не змінюють свого напрямку (рис.37).

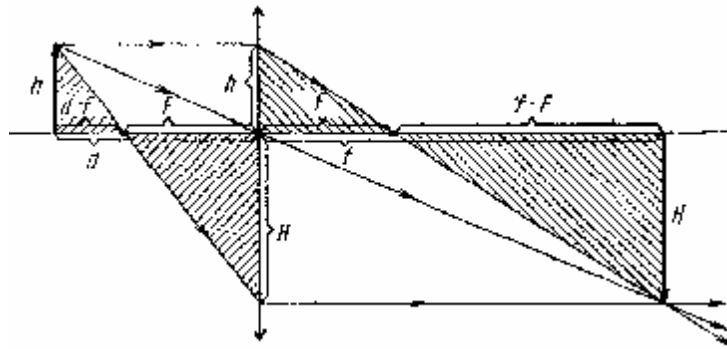


Рис.37

Формула тонкої лінзи. Відстань d від предмета до оптичного центра лінзи O , відстань f від зображення до точки O і фокусна відстань F пов'язані таким співвідношенням:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}. \quad (6.12)$$

Його називають *формулою тонкої лінзи*. Інакше:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = D. \quad (6.13)$$

де $D = \frac{1}{F}$ — *оптична сила* лінзи. Відстані до дійсних зображень треба брати зі знаком плюс, а до уявних — зі знаком мінус.

Лінійне і кутове збільшення зображення. Відношення лінійного розміру зображення до відповідного лінійного розміру предмета називають *лінійним збільшенням лінзи*:

$$g = \frac{|f|}{|d|}. \quad (6.14)$$

Величину, обернену лінійному збільшенню, називають *кутовим збільшенням* лінзи:

$$\Gamma = \frac{1}{g}. \quad (6.15)$$

§ 4. Світлові хвилі

Швидкість світла. Хвильові властивості світла та його взаємодію з речовиною вивчають у спеціальному розділі — *фізичній оптиці*.

Світло поширюється зі кінцевою швидкістю. За сучасними даними, швидкість світла у вакуумі дорівнює: $c = 299792456,2 \pm 0,8 \text{ м/с}$. Здебільшого з достатньою точністю можна приймати $c = 2,998 \times 10^{10} \text{ см/с}$, а для наближених підрахунків $c = 3 \times 10^{10} \text{ см/с}$.

Досліди свідчать, що швидкість світла в різних середовищах дорівнює:

$$V = c/n, \quad (6.16)$$

де c — швидкість світла у вакуумі;

n — абсолютний показник заломлення даного середовища.

Дисперсія світла. Так називається явище, що зумовлюється залежністю показника заломлення світла від довжини хвилі світла. Якщо на шляху вузького пучка променів білого світла встановити призму, на екрані побачимо видовжену світлову смугу, колір якої змінюється вздовж неї. Найменше заломлюються червоні промені, найбільше—фіолетові. Між червоним і фіолетовим поступово переходять один в одний оранжевий, жовтий, зелений, голубий і синій. Це так званий *спектр світла*. Залежність показника заломлення від λ означає, що швидкість поширення світлових хвиль різного кольору в даному середовищі різна. Найбільша швидкість у променів червоного, найменша — у променів фіолетового кольору. У вакуумі швидкості променів різного кольору однакові.

Інтерференція світла. Світло має хвильову природу, йому властиві явища інтерференції й дифракції. Інтерференція в результаті додавання когерентних світлових хвиль—це утворення світлих та темних смуг, тобто в одних місцях підсилення, а в інших—послаблення інтенсивності світла. Смуги в інтерференційній картині можуть бути різного кольору. Один з методів утворення когерентних хвиль—розщеплення хвилі, що випромінюється одним джерелом, на дві, шлях яких до точки спостереження різних. Прикладом є інтерференція в *тонких*

плівках.

Застосування явища інтерференції. Явище інтерференції використовується в спеціальних приладах — *інтерферометрах*, призначених для точного вимірювання довжини світлових хвиль, визначення показника заломлення газів, перевірки якості обробки поверхонь тощо. За допомогою інтерференції можна зменшити відбиття світла від поверхонь лінз, що поліпшує їхню характеристику (просвітлення оптики). Для цього на зовнішню поверхню оптичної системи (об'єктива) наносять тонку плівку з показником заломлення n_n меншим, ніж показник заломлення скла n_c . Якщо товщину плівки підібрати так, щоб відбитий від поверхні об'єктива промінь мав різницю ходу, кратну половині довжини хвилі в плівці, то на межі повітря—плівка спостерігатиметься послаблення хвилі, яка відбивається. Внаслідок цього значно зменшується частина світлової енергії, що відбивається, і збільшується частина, яка проходить крізь об'єктив. Погасити відбиті хвилі всіх частот неможливо. Тому товщину плівки підбирають так, щоб у разі нормального падіння гасилися хвилі середньої довжини в спектрі видимого світла (тобто світлові хвилі зеленого кольору, $l = 5,5 \times 10^{-5}$ см).

Дифракція світла. Явище огинання перешкод світловими хвилями, які поширюються в неоднорідному середовищі (отвір в екрані, межа непрозорих тіл) називають *дифракцією світла*. Пучок світлових променів, який проходить через маленький отвір, огинає його краї і на екрані видно світлу пляму, розмір якої більший, ніж той, що має бути в разі прямолінійного поширення світла. Якщо відстань між екраном і перешкодою, що її огинають світлові хвилі, дуже велика, тоді на екрані виникає характерна дифракційна картина—система світлих і темних смуг.

Явище дифракції обмежує роздільну здатність мікроскопа, оскільки зображення предметів, лінійні розміри яких близькі до довжини хвилі видимого світла, виходить розмитим. Роздільна здатність телескопа також обмежена явищем дифракції, бо, наприклад, зображення далекої зірки внаслідок дифракції має вигляд не точки, а системи світлих і темних кілець. Зірки відносно близькі одна від одної в телескопі не можна побачити роздільно, оскільки ці кільця перекриваються.

Дослід Юнга. Т. Юнг спостерігав дифракцію світла на двох отворах, розміщених на відносно невеликій відстані в непрозорому екрані, коли на них падав пучок променів, які пройшли через малий отвір в іншому екрані. У результаті дифракції на двох отворах світлові хвилі перекривалися і утворювалася інтерференційна картина. Якщо один з отворів закривали, інтерференційна картина зникала. Вимірюючи відстані між смугами різного кольору, Юнг досить точно визначив довжину відповідних світлових хвиль. Явище дифракції можна пояснити за допомогою принципу Гюйгенса-Френеля.

Дифракційна решітка. Оптичний прилад з великою кількістю вузьких прозорих щілин (розділених непрозорими проміжками), на яких спостерігається явище дифракції, називають *дифракційною решіткою*. Звичайно кількість щілин становить кілька тисяч на 1 мм. Величину $d = a + b$, де a —ширина прозорих щілин, b —ширина непрозорих проміжків, називають *періодом решітки*. Вторинні хвилі, що утворюються під час проходження світла через щілини, когерентні і тому інтерферують. Умова, за якої хвилі, що йдуть від щілин, підсилюють одна одну, така:

$$d \sin j = k l, \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (6.17)$$

де j — кут між напрямом променів, що створюють даний максимум, і перпендикуляром до поверхні дифракційної решітки (рис.38). Збиральна лінза L , що стоїть за дифракційною решіткою, збирає на екрані E , який розміщують у її фокальній площині, всі промені, що йдуть паралельно заданому куту j . Внаслідок залежності j від l (6.17) дифракційна решітка розкладає біле світло на спектр. Вимірюючи кут j і знаючи величину d , можна за допомогою дифракційної решітки досить точно визначити довжину хвилі l світла будь-якого кольору.

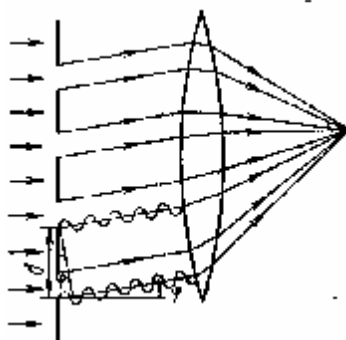


Рис.38

Поляризація світла. Явища хвильової оптики, в яких виявляється поперечність світлових хвиль, називають *поляризацією* світла. Світлову хвилю називають *плоскополяризованою*, якщо вектори напруженості електричного поля \vec{E} і магнітної індукції \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 називають пристрій, який перетворює природне світло в поляризоване. Простим поляризатором є одновісний кристал турмаліну, який має властивість пропускати світлові хвилі з коливаннями, що лежать в одній певній площині. Якщо пучок світлових променів, які стали плоскополяризованими після проходження крізь кристал турмаліну, пропустити через другий кристал, можна встановити положення площини поляризації цього пучка. Другий кристал в цьому разі називають

аналізатором і спостерігають зміну інтенсивності світла при обертанні його. Коли осі кристалів турмаліну взаємно перпендикулярні, світло крізь аналізатор не проходить зовсім (рис.39).



Рис.39

З електромагнітної теорії Максвелла безпосередньо випливає, що електромагнітні хвилі поперечні.

§ 5. Дія світла на речовини

Основні положення квантової оптики. Дискретний характер випромінювання, поширення і взаємодії світла з речовиною вивчають в квантовій оптиці (від латинського слова *квантум*, що означає кількість). Світло розглядають як потік частинок — *фотонів*, маса спокою яких дорівнює нулю ($m_0 = 0$). Енергія фотона

$$E = h\nu, \quad (6.18)$$

де $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ Дж} \times \text{с}$ — стала Планка (за ім'ям німецького фізика М.-К. Планка (1858—1947), який уперше висунув гіпотезу про дискретність процесу випромінювання і поглинання світла). Швидкість руху фотона дорівнює швидкості світла. Імпульс фотона має напрям поширення світла і за модулем дорівнює:

$$p = h\nu / c = h / l, \quad (6.19)$$

де l — довжина відповідної світлової хвилі. Із формули теорії відносності $E = mc^2$, або $p = mc$ маса фотона

$$m = h\nu / c^2 = h / l c. \quad (6.20)$$

Корпускулярні властивості світла виявляються тим виразніше, чим більша частота світлових коливань. Енергія фотонів видимого світла дуже мала. Наприклад, фотон зеленого світла має енергію $4 \times 10^{-19} \text{ Дж}$. Хвильові і квантові властивості мікрооб'єктів пояснює сучасна квантова механіка.

Зовнішній фотоэффект. Під впливом світла спостерігається виривання електронів з речовини. Таке явище називають *зовнішнім фотоэффектом*. Якщо на два електроди, що знаходяться у вакуумі, подати

напругу і крізь прозоре вікно освітлювати катод, по колу проходитиме струм (рис.40). Сила фотоструму залежатиме від інтенсивності світлового потоку. Досліди показують, що:

1) кількість електронів, які вириваються з речовини, прямо пропорційна інтенсивності світла;

2) швидкість цих електронів визначається частотою світла і не залежить від його інтенсивності;

3) для будь-якої речовини характерна мінімальна частота n_{\min} (червона межа фотоелектру), нижче якої фотоелектр не спостерігається.

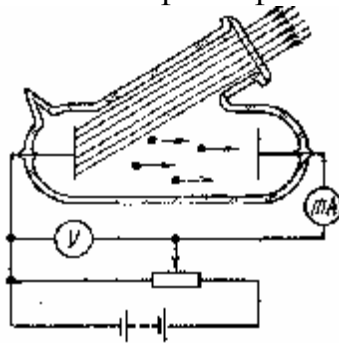


Рис.40

Друга і третя закономірності зовнішнього фотоелектру мають квантовий характер, і їх не може пояснити класична електромагнітна хвильова теорія.

Рівняння Ейнштейна. Розвиваючи ідеї Планка про переривчастість випромінювання світла, А. Ейнштейн (1881—1955) розробив теорію фотоелектру. Поглинання світла відбувається квантами з енергією $E = hn$, тому кінетичну енергію фотоелектрона можна визначити за допомогою закону збереження енергії:

$$hn = A + \frac{mV^2}{2}, \quad (6.21)$$

де A — робота виходу електрона;

m і V — маса і швидкість електрона. Енергія кванта має бути більшою ніж A :

$$hn \geq A. \quad (6.22)$$

Мінімальна частота n_{\min} (червона межа), з якої для даної речовини починається фотоелектр, дорівнює:

$$n_{\min} = A/h. \quad (6.23)$$

Наприклад, для цинку червона межа відповідає довжині хвилі $\lambda_{\min} = 3,7 \times 10^{-7} \text{ м}$ ультрафіолетового випромінювання. Тому в скляному посуді, що затримує ультрафіолетове проміння, фотоелектр на цинковому електроді не спостерігається.

Розділ VII

ФІЗИКА АТОМА І АТОМНОГО ЯДРА

§ 1. Фізика атома

Явища, що підтверджують складність будови атома. До 70-х років XIX ст. під атомами розуміли неподільні частинки речовини. Проте під кінець XIX ст. стали відомі факти, які свідчили, що атом — складна електрична система. Електризація тіл тертям, проходження струму через рідини і гази показали, що до складу атомів входять заряджені частинки. Досліджуючи катодне проміння, Дж.-Дж. Томсон (1856—1940) у 1897 р. відкрив електрон і виміряв його питомий заряд. Дослідження відкритого в 1896 р. А. Беккерелем (1852-1908) радіоактивного випромінювання свідчило, що з атомів радіоактивних речовин вилітають позитивно заряджені α -частинки, негативно заряджені β -частинки і γ -проміння.

Постулати Н. Бора (1885—1962). Класична електродинаміка в застосуванні до ядерної моделі атома не пояснила природи лінійчастих спектрів. Н. Бор створив іншу ядерну модель атома, скориставшись ідеями Планка і Ейнштейна про те, що світло випромінюється квантами, і сформулював такі постулати.

1. *Постулат стаціонарних станів:* атомна система може довгий час, без зовнішньої дії, перебувати тільки в стаціонарних станах, не випромінюючи при цьому енергії. Не зважаючи на те, що електрони в атомі рухаються з прискоренням, електромагнітних хвиль атом не випромінює. Кожному стаціонарному стану відповідає тільки певна енергія й певні орбіти, по яких рухаються електрони.

2. *Правило квантування орбіти:* в стаціонарному стані атома електрони, рухаючись по колових орбітах, повинні мати дискретні, квантові значення моменту імпульсу, що відповідає умові:

$$mV_n r_n = n \frac{h}{2\pi}, \quad (7.1)$$

де m — маса електрона;

V_n і r_n — швидкість електрона на n -й орбіті та її радіус;

h — стала Планка.

3. *Правило частот:* атом може переходити з одного стаціонарного стану в інший. При переході атома із стаціонарного стану з більшою енергією в стан з меншою енергією випромінюється один фотон. Для переходу електрона із стаціонарного стану з меншою енергією в стан з

більшою енергією атом має поглинути квант енергії (рис.41).

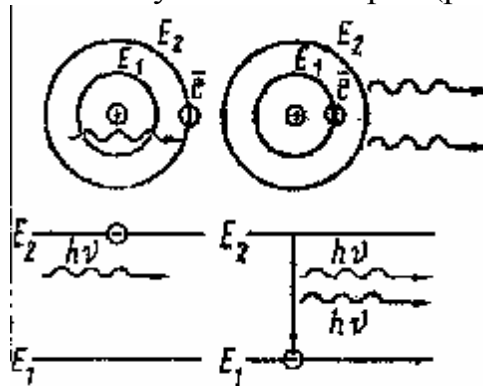


Рис.41

Енергію поглинутого кванта й енергію фотона, що випромінюється, можна знайти з формули:

$$DE = E_k - E_n, \quad (7.2)$$

де E_k і E_n — енергія атома під час руху електронів на k -й і n -й орбітах;

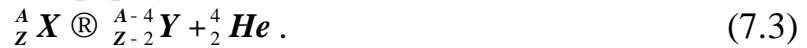
DE — енергія кванта;

n — частота випромінюваної електромагнітної хвилі.

§ 2. Фізика атомного ядра

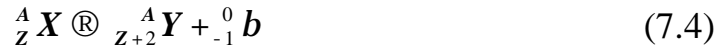
Природна радіоактивність. α -, β -, γ -промені. У 1896 р. французький фізик А. Беккерель (1852—1908) відкрив природну радіоактивність урану, а в 1898 р. французькі фізики П'єр і Марія Кюрі відкрили два нові радіоактивні елементи—полоній (${}^{210}_{84}\text{Po}$) і радій (${}^{226}_{88}\text{Ra}$). Явище природної радіоактивності — це явище самовільного перетворення атомних ядер, яке супроводжується випромінюванням α -, β -, γ -променів. Воно не залежить від зовнішніх умов і є властивістю атомних ядер. Радіоактивне випромінювання викликає люмінесценцію, іонізує атоми, йому властива фотохімічна дія, воно має енергію і високу проникну здатність. Електричне або магнітне поле розділяє радіоактивне випромінювання на три пучки α -, β -, γ -променів. α -промені — це потік ядер атомів ${}^4_2\text{He}$ зі швидкістю $15 \cdot 10^3 - 20 \cdot 10^3 \frac{\text{км}}{\text{с}}$. β -промені—потік електронів з $v \approx 1,6 \cdot 10^5 \frac{\text{км}}{\text{с}}$. За сучасною теорією β -розпаду, електрони вилітають з ядра в результаті такого перетворення: ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}\beta + \tilde{\nu} + \gamma$ ($\tilde{\nu}$ — антинейтрино). g -промені—це потік квантів електромагнітного випромінювання з $l = 40, 0, 1 \text{ нм}$. Найбільшу проникну здатність мають γ -промені, найменшу— α -промені.

Правило зміщень. Радіоактивний розпад відбувається відповідно до законів збереження заряду (зарядового числа Z), маси і енергії, а - розпад відбувається за такою формулою:



Наприклад: ${}^{226}_{88} Ra \rightarrow {}^{226}_{86} Rn + {}^4_2 He$

b - розпад:



Наприклад: ${}^{239}_{92} U \rightarrow {}^{239}_{93} Np + {}^0_{-1} b$.

Правило зміщення хімічних елементів у таблиці Менделєєва при радіоактивному розпаді сформулював англійський фізик і хімік Ф. Содді і незалежно від нього німецький фізик К. Фаянс у 1913 р.: при α -розпаді хімічний елемент зміщується в періодичній таблиці на два місця вліво, при β -розпаді—на одне місце вправо, а γ -випромінювання зміщень не викликає. Більшість новоутворених ядер під час розпаду радіоактивних речовин є радіоактивними і потім розпадаються.

Радіоактивні ряди. Послідовність елементів при радіоактивному розпаді називають *радіоактивним рядом*. Відомо чотири радіоактивні ряди: 1) ряд урану починається з ${}^{238}_{92} U$ ($t = 4,5 \times 10^9$ років), зазнає 14 радіоактивних перетворень (8 α -розпадів і 6 β -розпадів), кінцевий продукт — ${}^{206}_{82} Pb$; 2) ряд торію ${}^{232}_{90} Th$ ($t = 1,4 \times 10^{10}$ років) з кінцевим продуктом ${}^{208}_{82} Pb$; 3) ряд актинію починається з ${}^{235}_{89} Ac$ ($t = 7,3 \times 10^8$ років) і закінчується ${}^{207}_{82} Pb$; 4) ряд нептунію починається з ${}^{237}_{93} Np$ ($t = 2,2 \times 10^6$ років) і закінчується ${}^{209}_{83} Bi$.

Закон радіоактивного розпаду. У результаті радіоактивного розпаду число ядер, що не розпалося N , порівняно з початковим числом N_0 зменшується з часом t за експоненціальним законом:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 2^{-\frac{t}{T}} . \quad (7.5)$$

Число ядер N_1 , які розпалися за час t , збільшується за законом:

$$N_1 = N_0 (1 - e^{-\lambda t}) = N_0 \left(1 - 2^{-\frac{t}{T}} \right) , \quad (7.6)$$

де λ — стала розпаду пов'язана з періодом піврозпаду T так:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} = \frac{0,693}{T} . \quad (7.7)$$

Період піврозпаду T — це час, за який розпадається половина із загальної кількості атомів радіоактивної речовини.

Закономірність радіоактивного розпаду використовують для того, щоб визначити вік порід, предметів

$$t = \frac{1}{I} \ln \frac{N_0}{N} = 1,44t \ln \frac{N_0}{N}. \quad (7.8)$$

В археології вік предметів визначають за зменшенням кількості ядер ізотопу вуглецю $^{14}_6\text{C}$ ($t = 5570$ років). Процентний вміст цього ізотопу в земній атмосфері сталий, тому це співвідношення зберігається і в живих організмах. Після загибелі цих організмів вміст $^{14}_6\text{C}$ зменшується. Визначивши $\frac{N_0}{N}$, можна обчислити час від моменту їхньої загибелі.

Склад і характеристика ядра. У 1932 р. радянський фізик Д. Д. Іваненко і німецький фізик В. Гейзенберг запропонували протонно-нейтронну теорію ядра: ядро складається з Z (порядковий номер елемента) протонів і $(A - Z)$ — нейтронів (A — масове число). Протони і нейтрони називають *нуклонами*, їхні маси спокою:

$$m_p = 1,00758 \text{ а.о.м.} = 1836 m_e; \quad m_n = 1,00898 \text{ а.о.м.} = 1838 m_e.$$

Зарядове число Z визначає заряд ядра в елементарних зарядах ($e = 1,602 \times 10^{-19}$ Кл). Масове число — це заокруглене значення атомної маси ядра в атомних одиницях маси. Атомна одиниця маси (а. о. м.) дорівнює $\frac{1}{12}$ маси ізотопу вуглецю $^{12}_6\text{C}$. Ядра хімічних елементів записуються так: $^A_Z X$, наприклад ^1_1H , ^4_2He , $^{16}_8\text{O}$ і т. д.

Ізотопи, ізобари. Атомні ядра, які характеризуються однаковим зарядовим числом Z (однакова кількість протонів), але різним масовим числом A (різна кількість нейтронів) називають ізотопами, наприклад: ^1_1H , ^2_1H , ^3_1H — ізотопи водню, ^3_2He , ^4_2He — ізотопи гелію. Зараз відомо понад 300 стійких і понад 1000 нестійких ізотопів.

Атомні ядра з однаковим масовим числом, але різним зарядовим числом називають *ізобарами*, наприклад: $^{30}_{16}\text{S}$, $^{30}_{18}\text{Ar}$. Відомо 56 ізобарних пар і 5 ізобарних тріад.

Енергія зв'язку атомного ядра. Під енергією зв'язку атомного ядра розуміють енергію, необхідну для повного розчеплення ядра на нуклони без надання їм кінетичної енергії.

Точні вимірювання показують, що маса спокою ядра $M_{\text{я}}$ завжди менша від суми мас протонів і нейтронів:

$$\Delta M = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}, \quad (7.9)$$

де ΔM — дефект маси ядра визначає енергію зв'язку частинок у ядрі:

$$E_{\text{зв}} = \Delta M c^2 = (Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}})c^2 \quad (7.10)$$

Якщо масу m вимірювати в кг, швидкість світла у вакуумі V - в $\frac{m}{c}$, то $E_{\text{зв}}$ буде в Дж.

Однак у ядерній фізиці енергію зв'язку вимірюють у мегаелектронвольтах (MeV), тоді масу вимірюють в а. о. м., а енергію обчислюють за формулою:

$$E_{36} = \Delta Mc^2 = (Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\alpha})931,44 \quad (7.11)$$

Питому енергію зв'язку, що припадає на один нуклон, визначають за формулою:

$$DW_{36} = \frac{DE_{36}}{A} \quad (7.12)$$

Ядерні сили. Велика питома енергія зв'язку свідчить про те, що зв'язок між частинками не визначається ні гравітаційними, ні електромагнітними силами, через те, що вони дуже малі. Між протонами діють кулонівські сили відштовхування. Між нуклонами в ядрі існує ядерна взаємодія — *ядерні сили*. Ця взаємодія в 137 разів інтенсивніша за електромагнітну взаємодію, тому її часто називають *сильною*. Ядерні сили притягання мають свої особливості. Це короткодійні сили з радіусом дії $\gg 2,2 \times 10^{-15} \text{ м}$. Для них характерна зарядова незалежність, тобто сили взаємодії однакові як для заряджених, так і для незаряджених нуклонів. Крім цього, їм властива насиченість, енергія зв'язку на один нуклон досягає насичення, бо нуклони в ядрі взаємодіють з обмеженою кількістю нуклонів. На відміну від кулонівських і гравітаційних, ядерні сили *нецентральні*. Взаємодія нуклонів у ядрі здійснюється за допомогою *p*-мезонів, якими вони постійно обмінюються.

Ядерні реакції—це перетворення атомних ядер у результаті їхньої взаємодії з елементарними частинками або іншими ядрами. Спонтанний (самовільний) поділ ядер відбувається без зовнішніх впливів. Для проходження ядерної реакції налітаюча частинка має наблизитися до бомбардуючого ядра на відстань дії ядерних сил ($\gg 2 \times 10^{-15} \text{ м}$). Результат реакції залежить від енергії налітаючої частинки.

У ядерних реакціях справджуються всі закони збереження, і зокрема, електричного заряду (зарядового числа) і числа нуклонів: *сума зарядових чисел і масових чисел атомних ядер до реакції і після реакції відповідно дорівнює одна одній та ін.*

Ядерні реакції звичайно мають два етапи: 1) бомбардуюча частинка проникає в ядро-мішень і утворюється складене ядро; 2) у середині складеного ядра нуклони перегруповуються, «зайві» частинки і надлишкова енергія викидаються, і утворюється нове ядро. Такі перетворення відбуваються за $10^{-14} - 10^{-15} \text{ с}$. Символічно обидва етапи можна записати так:



Наприклад: ${}_{7}^{14}\text{N} + {}_{2}^{4}\text{He} \text{ @ } {}_{9}^{18}\text{F} \text{ @ } {}_{8}^{17}\text{O} + {}_{1}^{1}\text{H}$.

Цю реакцію вперше здійснив у 1919 р. Резерфорд. Скорочено її записують так: ${}^4_2\text{He}(\alpha, p){}^{17}_8\text{O}$.

Ядерні реакції можуть спричинювати не тільки α -частинки, а й протони, нейтрони та інші елементарні частинки і ядра, наприклад: ${}^7_3\text{Li}(p, n){}^7_4\text{Be}$, ${}^1_0\text{n}(n, g){}^1_0\text{n}$.

Енергію ядерної реакції можна визначити за формулою:

$$DW = (\sum \dot{M}_i - \sum \dot{M}_k) 931,4 \text{ MeV} , \quad (7.14)$$

де $\sum \dot{M}_i$ — сума мас частинок, які вступають у реакцію;

$\sum \dot{M}_k$ — сума мас утворених частинок (в а. о. м.). Якщо $DW > 0$, реакція проходить з виділенням енергії і називається екзоенергетичною. Якщо ж $DW < 0$, реакція ендоенергетична і для того, щоб реакція відбувалася, потрібна енергія.

Поділ ядер — це реакція розділення важкого ядра, збудженого захопленням нейтрона, на приблизно рівні частини.

Уперше її було відкрито на ядрах ізоотопу урану ${}^{235}_{92}\text{U}$ німецькими фізиками О. Ганом і Ф. Штрассманном у 1938 р. Незалежно від Н. Бора і Дж.-А. Уілера Я. І. Френкель сформулював у 1939 р. основи сучасної теорії поділу важких ядер. У 1940 р. радянські фізики Г. М. Фльоров і К. А. Петржак відкрили спонтанний поділ ядер урану ${}^{235}_{92}\text{U}$. Тепер виявлено спонтанний поділ більше як 50 ізоотопів різних елементів. Поділ під дією теплових нейтронів може відбуватися в ізотопах ${}^{235}_{92}\text{U}$ і плутонію ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ і під дією швидких нейтронів у ізотопі ${}^{238}_{92}\text{U}$. Механізм поділу пояснює крапельна модель ядра: коли нейтрон потрапляє в ядро, воно деформується і під дією кулонівських сил відбувається поділ його на два осколки з відношенням мас 2:3 і випромінення 2—3 нейтронів.

При цьому виділяється енергія 200 MeV на один акт поділу (168 MeV припадає на кінетичну енергію осколків). Така енергія виділяється тому, що питома енергія зв'язку нуклонів у осколках на $\approx 1 \text{ MeV}$ більша, ніж у ядрі урану. При поділі всіх ядер у 1 кг урану виділяється $79,2 \times 10^{12} \text{ Дж}$, що еквівалентно енергії, яка виділяється під час повного згоряння 3000 т вугілля або 2500 т нафти. Усі хімічні елементи можуть ділитися, але не всі при цьому випромінюють достатню кількість нейтронів.

Ланцюгова реакція. Якщо в ядро ${}^{235}_{92}\text{U}$ потрапляє нейтрон, то при поділі ${}^{235}_{92}\text{U}$ вилетить 2—3 нейтрони, а в разі їх наступного попадання в ядра виникне 2^2 - 3^2 нейтронів і т. д. Реакція поділу безперервно підтримуватиметься і таким чином виникне ланцюгова реакція (рис.42).

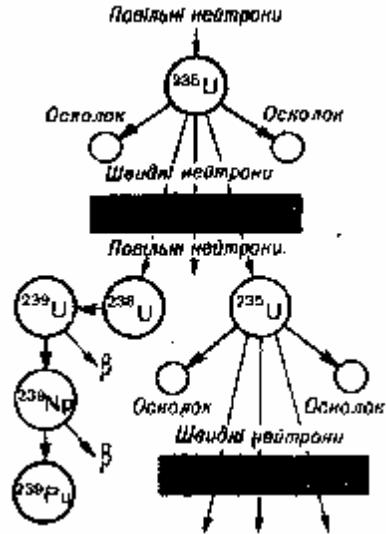


Рис.42

Коефіцієнт розмноження нейтронів має бути більшим за одиницю (відношення кількості нейтронів, які викликають поділ у даному і попередньому акті поділу). Зменшують коефіцієнт розмноження такі причини: 1) вилітання нейтронів за межі тіла, що ділиться; 2) захоплення нейтронів ізотопом $^{238}_{92}\text{U}$ й без поділу; 3) захоплення нейтронів домішками. Першу причину ліквідують збільшенням маси речовини, що ділиться, до більшої за критичну і використанням відбивачів нейтронів з тих самих речовин, що й сповільнювачі. Другу і третю—очищенням від домішок і збагаченням куска урану ізотопом $^{235}_{92}\text{U}$ і сповільненням нейтронів до теплових (у природному урані лише 0,7% ізотопу $^{235}_{92}\text{U}$).

Ядерний реактор (атомний котел). Це установка, в якій здійснюється керована ланцюгова ядерна реакція (рис.43).

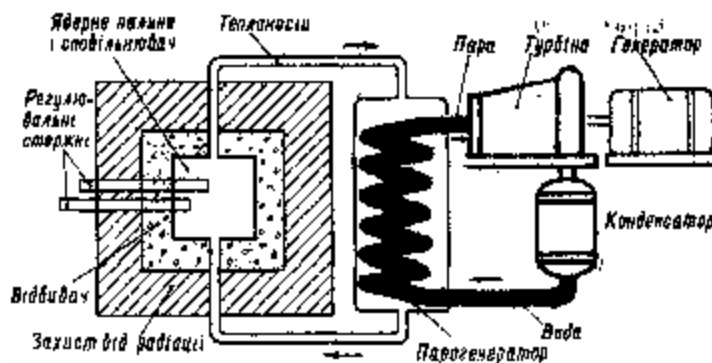


Рис.43

Основними елементами ядерного реактора є ядерне паливо, сповільнювач, відбивач і поглинач нейтронів, теплоносій для відведення

тепла під час роботи реактора. Ядерні реактори на повільних (теплових) нейтронах бувають двох типів: *гомогенні*, в яких палне рівномірно розподіляється в об'ємі сповільнювача, наприклад, солі урану розчинені у воді; і *гетерогенні*, в яких палне і сповільнювач (наприклад, графіт) розділені.

Термоядерні реакції. Через те, що питома енергія зв'язку легких елементів менша, ніж важких, то під час синтезу з легких елементів має виділятися енергія. Так, наприклад, під час реакції ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ виділяється 17,6 МеВ енергії.

Для того щоб два ядра злилися в одне, їх треба наблизити до відстані дії ядерних сил ($\gg 10^{-15} \text{ м}$), тобто вони мають подолати потенціальний бар'єр кулонівських сил відштовхування. Тому дейтрони повинні мати кінетичну енергію, що відповідає тепловому руху при температурі $2 \times 10^9 \text{ К}$. Однак виявляється, що для реалізації реакції синтезу достатньо температури 10^7 К (завдяки максвелівському розподілу швидкостей). Реакції синтезу називають *термоядерними*.

На Сонці є до 80% водню і до 20% гелію, температура— 10^7 К , тому там можуть відбуватися термоядерні реакції синтезу, які вважають джерелом енергії, що компенсує втрати енергії на випромінювання. Передбачають, що на Сонці відбуваються протон-протонний і вуглецево-азотний цикли, у яких з протонів синтезується гелій і виділяється багато енергії.

ОСНОВНІ ФІЗИЧНІ СТАЛІ

Нормальне прискорення вільного падіння....	$g = 9.81 \text{ м/с}^2$
Гравітаційна стала.....	$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 / (\text{кг} \cdot \text{с}^2)$
Стала Авогадро.....	$N_A = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Молярна газова стала.....	$R = 8.31 (\text{Дж} / \text{моль} \cdot \text{К})$
Молярний об'єм газів при н.у.	$V_{0m} = 22.4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{моль}$
Стала Больцмана.....	$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} / \text{К}$
Стала Фарадея.....	$F = 9.65 \cdot 10^7 \text{ Кл} / \text{моль}$
Елементарний заряд.....	$e = 1.60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Маса електрона.....	$m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Питомий заряд електрона.....	$e / m = 1.76 \cdot 10^{11} \text{ Кл} / \text{кг}$
Швидкість світла у вакуумі.....	$3.00 \cdot 10^8 \text{ м} / \text{с}$
Стала Стефана-Больцмана.....	$s = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Стала закону зміщення Віна.....	$b = 2.90 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Стала Планка.....	$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
	$\hbar = 1.05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Стала Ридберга.....	$R = 2.07 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$
	$R' = 1.10 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$
Борівський радіус.....	$a = 5.29 \cdot 10^{-11} \text{ м}$
Комптонівська довжина хвилі електрона.....	$l_c = 2.43 \cdot 10^{-12} \text{ м}$
Магнетон Бора.....	$m_B = 9.27 \cdot 10^{-24} \text{ Дж} / \text{Тл}$
Енергія іонізації атома водню.....	$E_i = 2.18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$
Атомна одиниця маси.....	$1 \text{ а.о.м.} = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Ядерний магнетон.....	$m_N = 5.05 \cdot 10^{-27} \text{ А} \cdot \text{м}^2$
Електрична стала.....	$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} / \text{м}$
Магнітна стала.....	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн} / \text{м}$

Таблиці фізичних величин

Густина ρ твердих тіл і рідин (Мг/м³, або г/см³)

Тверді тіла

Алюміній.....	2,70
Вісмут.....	9,80
Вольфрам.....	19,3
Залізо (чавун, сталь)..	7,87
Золото.....	19,3
Кам'яна сіль.....	2,20

Латунь.....	8,55
Марганець.....	7,40
Мідь.....	8,93
Нікель.....	8,80
Платина.....	21,4
Свинець.....	11,3
Срібло.....	10,5
Уран.....	18,7
Рідини (при 15° С)	
Вода (дистильована при 4° С).....	1,00
Гліцерин.....	1,26
Гас.....	0,8
Масло	0,9
Олія рицинова.....	0,96
Ртуть.....	13,6
Сірковуглець.....	1,26
Спирт.....	0,8
Ефір.....	0,7
Густина газів при нормальних умовах (кг/м³)	
Азот.....	1,25
Аргон.....	1,78
Водень.....	0,09
Повітря	1,29
Гелій.....	0,18
Кисень.....	1,43
Діелектрична проникність ϵ	
Вода.....	81
Масло (трансформаторне).....	2,2
Парафін.....	2,0
Слюда.....	7,0
Скло.....	7,0
Фарфор.....	5,0
Ебоніт.....	3,0
Показник заломлення n	
Алмаз.....	2,42
Вода.....	1,63
Сірковуглець.....	1,33
Скло.....	1,50

СЛОВНИК ТЕРМІНІВ

<p>А</p> <p>Аберрация абсорбция автоколебание адиабата адиабатный аккумуляирование аккумулятор аллотропия альфа-излучатель альфа-излучение альфа-лучи альфа-радиоактивность альфа-распад альфа-частица ампер-час анизотропия аннигиляция антенна антивещество антинейтрино антинейтрон античастица асимметрия асинхронность атомистический аэродинамика</p> <p>Б</p> <p>барион барионный безграничный бесконечность бета-активность бета-излучатель бета-излучение бета-лучи бета-радиоактивность бета-распад бета-частица биение близкодействие близорукий броуновский быстродействующий</p> <p>В</p> <p>вакуум</p>	<p>аберація абсорбція автоколивання адіабата адіабатний акумулювання аккумулятор алотропія альфа-випромінювач альфа-випромінювання альфа-промені альфа-радіоактивність альфа-розпад альфа-частинка ампер-година анізотропія анігіляція антена антиречовина антинейтрино антинейтрон античастинка асиметрія асинхронність атомістичний аеродинаміка</p> <p>баріон баріонний безмежний нескінченність бета-активність бета-випромінювач бета-випромінювання бета-промені бета-радіоактивність бета-розпад бета-частинка биття близькодія короткозорий броунівський швидкодіючий</p> <p>вакуум</p>	<p>aberration absorption auto-oscillation adiabat adiabatic accumulation accumulator allotropy alpha-emitter alpha-radiation alpha ray alpha-radio-activity alpha-disintegration alpha-particle ampere-hour aeolotropism, anisotropy annihilation aerial antimatter antineutrino antineutron anti-particle asymmetry asynchronous atomistic aerodynamics</p> <p>baryon baryon boundless endlessness beta-activity beta-emitter beta rays beta rays beta-radio-activity beta-disintegration beta-particle beating short-range short-sighted, near-sighted brownian fast-acting</p> <p>vacuum</p>
---	---	---

валентность	валентність	valency
ваттметр	ватметр	wattmeter
ватт-час	ват-година	watt-hour
вес	вага	weight
весомость	вагомість	ponderability
весы	терези	scales
вещество	речовина	matter
взаимодействие	взаємодія	co-operation
взрыв	вибух	explosion
вибратор	вібратор	vibrator
включать	вмикати	engage
влажность	вологість	humidity, moisture
внеядерный	позаядерний	extranuclear, extra-nuclear
внутриатомный	внутрішньоатомний	interatomic
внутриядерный	внутрішньоядерний	intranuclear
водоструйный	водострумний	water-jet
возбуждение	збудження	excitation
возмущать	збурювати	to revolt
волна	хвиля	wave
волновой	хвильовий	wave
восприимчивость	сприйнятливість	receptivity
вращательный	обертальний	rotatory
вращающий	обертаючий	revolving
вращающийся	обертовий	circulating
вращение	обертання	rotation
время	час	time
вселенная	всесвіт	universe
выключатель	вимикач	switch
выключить	вимкнути	to turn off
выпрямитель	випрямляч	rectifier
высокорadioактивный	високорадіоактивний	high-radio-active
высокочастотный	високочастотний	high-frequency
вязкость	в'язкість	viscosity
Г		
газообразный	газоподібний, газуватий	gaseous,
гальванический	гальванічний	galvanic
гальванопластика	гальванопластика	electrotype
гамма-активность	гамма-активність	gamut-activity
гамма-излучатель	гамма-випромінювач	gamut-emitter
гамма-излучение	гамма-випромінювання	gamma-radiation
гамма-лучи	гамма-промені	gamma-rays
гармонический	гармонічний	harmonic
генерирование	генерування	generation
германиевый	германієвий	germanic, germanium
гистерезис	гістерезис	hysteresis
глаз	око	eye
горючее	пальне	fuel
гравитационный	гравітаційний	gravitation
грозоотметчик	грозовідмітник	storm indicator

громкоговоритель громкость громоотвод	гучномовець гучність громовідвід	loud speaker volume lightning-rod
Е емкостный емкость естественный	ємнісний ємність; місткість природний	capacity capacity natural
Ж жаропрочный жаростойкий жароупорность жесткость жидкость	жароміцний жаростійкий жаротривкість твердість, жорсткість рідина	heatproof heat-resistant heat-resistant hardness, inflexibility liquid
З зазор замедление замедлитель замыкание запись запрет заряд затвердение затмение затормозить затухание зеркало зрачок зрение зрительный	проміжок, зазор сповільнення сповільнювач замикання запис заборона заряд затвердіння затемнення загальмувати затухання, загасання дзеркало зіниця зір зоровий	interval, gap deceleration decelerator, deterrent shorting record prohibition charge induration, callosity darkening to put on the brakes fading mirror pupil sight visual
И измерение износ изобарный изображение изохора изохорный импульс индифферентность индуктивность индукционный индукция инертность инерциальный инерция интерференция ионизация	вимірювання знос ізобарний зображення ізохора ізохорний імпульс індиферентність індуктивність індукційний індукція інертність інерційний інерція інтерференція іонізація	measuring tearing down isobar image isochor isochoric impulse indifference inductance induction induction sluggishness inertial inertia interference ionization

<p>ионный искажение искусственный испарение испускание источник</p> <p>К</p> <p>калориметр калория капилляр капиллярность катодный катушка квантование киловатт-час килогерц кинематика кинескоп кипение клемма когерентность колебание колебательный коллектор конвекции короткодействие коэффициент криогенный кристалл кристаллизация крутизна кручение кулоновский</p> <p>Л</p> <p>линза лупа луч лучеиспускание лучепреломление лучистый люминесценция люминесцирующий люминофор</p> <p>М</p> <p>магнетик магнитный макромир</p>	<p>іонний спотворення штучний випаровування випромінювання джерело</p> <p>калориметр калорія капіляр капілярність катодний котушка квантування кіловат-година кілогерц кінематика кінескоп кипіння клема когерентність коливання коливальний колєктор конвекція короткодїючий коефіцієнт крїюгенний кристал кристалізація крутість кручення, крутіння кулонівський</p> <p>лінза лупа промінь випромінювання променезаломлення променистий люмінесценція люмінесціюючий люмінофор</p> <p>магнетик магнітний макросвіт</p>	<p>ionic distortion artificial evaporation emission, radiation source</p> <p>calorimeter calorie capillary capillarity cathode coil, bobbin quantum kilowatt-hour kilocycle kinematics kinescope boiling terminal coherent oscillation swaying collector convection short-range coefficient, factor cryogen, cryogenic crystal crystallization steepness twisting, torsion coulomb</p> <p>lens magnifier ray radiation refraction radiant luminescence luminescing lyuminoфор</p> <p>magnetic magnetic macrocosm</p>
--	--	--

<p>масса микромир модуляция молния молярность монохроматический мощность</p> <p>Н</p> <p>нагнетательный нагреватель нагревательный нагрузка накал накаливание намагничение намагниченность намагничивание напряжение напряженность насыщение натяжение невесомый необратимость неопределенность непрерывность нерелятивистский смачивание нестабильный неустойчивость носитель нулевой</p> <p>О</p> <p>обкладка облучать облучение оболочка оборот обратимость обратимый обратный обращение обтекаемость одновременность однородность однофазный опилки освещенность осциллограф</p>	<p>маса мікросвіт модуляція блискавка молярність монохроматичний потужність</p> <p>нагнітальний нагрівач, нагрівник нагрівальний навантаження розжарення розжарювання намагнічення намагніченість намагнічування напруга напруженість насичення натяг невагомий необоротність невизначеність неперервність нерелятивістський змочування нестабільний нестійкість носії нульовий</p> <p>обкладка опромінювати опромінення оболонка оберт оборотність оборотний обернений обертання обтічність одночасність однорідність однофазний ошурки освітленість осцилограф</p>	<p>mass microcosm modulation lightning molar monochromatic power</p> <p>force heater heating load incandescence incandescence magnetization magnetization magnetization tension, voltage tensity, tenseness satiation, satiety pull, tension imponderable, weightless irreversibility vagueness continuity no the relativism incommensurable instability, unsteadiness unstable bearer zero</p> <p>facing, turfing ray, treat with rays irradiation cover(ing), shell turnover; transaction reversibility reversible back, return, reverse treatment, circulation streamlining simultaneity homogeneity, uniformity monophase sawdust, filings illumination oscillograph</p>
--	--	--

<p>осциллятор относительность отражатель отражающий отрицательный отталкивание очки</p> <p>П падение пар парамагнитный парообразование передатчик переключатель перемещение плавление пластичность пленка плотность поглощение показатель покой положительный полоса полупроводник полураспад поляризация понижающий постоянная поступательный поток предохранитель проницаемость</p> <p>Р работа равновесие равнодействующая равномерный равноускоренный радиоактивность размагнитить размагничивание размерность разряд разряженный расплавлять распределение рассеяние</p>	<p>осцилятор відносність відбивач відбивний негативний, від'ємний відштовхування окуляри</p> <p>падіння пара парамагнітний пароутворення передавач перемикач переміщення плавлення пластичність плівка густина поглинання показник спокій позитивний смуга напівпровідник піврозпад поляризація знижувальний стала поступальний потік запобіжник проникність</p> <p>робота рівновага рівнодійна рівномірний рівноприскорений радіоактивність розмагнітити розмагнічування розмірність розряд розряджений розплавлювати розподіл розсіяння</p>	<p>oscillator relativity baffler, reflector glassy, reflective negative repulsion spectacles, (eye)glasses</p> <p>incidence steam paramagnetic vaporization transmitter switch travel melting plasticity film; pellicle; tape density absorption exponent, index rest, repose, peace; calm positive stripe, streak semi-conductor half-decay polarization flat, lower, bring down constant forward stream; torrent; flow safety device/catch/lock penetrability, penetration</p> <p>work equipoise, balance resultant (force) even, equal, uniform uniformly accelerated radio(-)activity demagnetize; cool off demagnetization dimension category, class discharge melt (down), found, fuse distribution; assessment dispersion; dispersion</p>
---	---	--

<p>расстояние растяжение релятивистский рентгеновский решетка рычаг</p>	<p>віддаль, відстань розтяг релятивістський рентгенівський гратка, решітка важіль</p>	<p>distance, space, interval stretching; straining relativist roentgen grating, grate, lattice lever, key factor, linchpin</p>
<p>С самопроизвольность сварка сверхпроводимость сверхтекучесть свет светосила светофильтр сдвиг сердечник сеть сжатие сжижение сжимаемость система отсчета скорость слой смачивание смещение соединение сопротивление состояние сохранение стойкость строение счетчик</p>	<p>спонтанність зварювання, зварка надпровідність надтекучість світло світлосила світлофільтр зсув осердя сітка, мережа, система стиск, стискання зрідження, скраплення стисливість система відліку швидкість шар змочування зміщення з'єднання опір стан збереження стійкість будова лічильник</p>	<p>spontaneity weld(ing) superconductivity superfluidity light light power colour filter shift; displacement core network, system; circuit pressure, pressing, liquation, liquefaction condensability, system counting out speed layer;stratum moistening, wetting displacement, joining, junction resistance, opposition state, condition; preservation, firmness collision, clash construction, building counter, meter</p>
<p>Т таяние твердение твердость текучесть теплоемкость теплообмен теплопроводность теплотворность термосопротивление термоэлектричество термоядерный тормозить траектория трение трехфазный</p>	<p>танення тверднення твердість текучість теплоємність теплообмін теплопровідність теплотворність термоопір термоелектрика термоядерний гальмувати траєкторія тертя трифазний</p>	<p>thaw(ing) hardening hardness, solidity fluidity, fluctuation thermal/heat capacity heat exchange heat/thermal conductivity heating/calorific value heatresistance hermoelectricity hermonuclear apply the brake, hamper trajectory riction, rubbing three-phase</p>

<p>триод тугоплавкий тяготение</p> <p>У удельный узел ультрафиолетовый упругость усилитель ускорение ускоритель устойчивость</p> <p>Ф фаза фокусировка фотопроводимость фотоспротивление фотоэлектрический фотоэлемент</p> <p>Х хаотический холодильник хрупкость хрусталик</p> <p>Ч чувствительность чужеродный</p> <p>Ш шероховатость шунтирование</p> <p>Щ щелочной щетка</p> <p>Э эбонит эквипотенциальный электризация электродвигатель электродвижущая сила</p>	<p>тріод тугоплавкий тяжіння</p> <p>питомий вузол ультрафіолетовий пружність підсилювач прискорення прискорювач стійкість</p> <p>фаза фокусування фотопровідність фотоопір фотоелектричний фотоелемент</p> <p>хаотичний холодильник крихкість кришталік</p> <p>чутливість сторонній</p> <p>шорсткість шунтування</p> <p>лужний щітка</p> <p>ебоніт еквіпотенціальний електризація електродвигун електрорушійна сила</p>	<p>triode refractory gravitation, gravity</p> <p>specific unit, assembly ultra-violet elasticity, resiliency booster acceleration accelerator steadiness, firmness</p> <p>phase; stage focus photoconductivity photoresistance photoelectric photoelectric cell</p> <p>chaotic refrigerator; fridge fragility, frailness, frailty crystalline lens</p> <p>apprehensibility, perceptibility alien</p> <p>roughness bridge, shunt</p> <p>chink; crack brush</p> <p>ebonite equipotential electrization electric motor electromotive force</p>
--	---	---

<p> электроемкость электролиз электромагнетизм электропроводимость электросопротивление электростатический электрохимический эмиссия энергия энтропия </p> <p>Я</p> <p> явление ядерный якорь яркость ячейка </p>	<p> електроемність електроліз електромагнетизм електропровідність електроопір електростатичний електрохімічний емісія енергія ентропія </p> <p> явище ядерний якір яскравість комірка </p>	<p> (electro-)capacity electrolysis electromagnetism conductivity, conductance electrical resistivity electrostatic electrochemical emission energy entropy </p> <p> phenomenon nuclear anchor brightness cell </p>
---	---	--

ЛІТЕРАТУРА

1. Снычѐва Л. В. Физика: Учеб. пособие для иностр. учащихся подготов. отд-ния. Ч.1 (со словарем). - Симферополь: Изд. центр КГМУ, 2000.- 173 с.
2. Снычѐва Л. В. Физика: Учеб. пособие для иностр. учащихся подготов. отд-ния. Ч. 2. - Симферополь: ЧП «Эльиньо», 2003. - 82 с.
3. Физика: Учеб. пособие для студентов-иностранцев подготов. ф-тов вузов / Л. Н. Корочкина, А. С. Каурова, Л. Д. Шутенко, Б. П. Стасюк. - М.: Высш. шк., 1983. - 392 с.
4. Вердеревская Н. Н., Егорова С. П. Сборник задач и вопросов по физике: Учеб. пособие. - 2-е изд., доп. и перераб. - М.: Высш. шк., 1980. - 216 с.
5. *Методические* указания к самостоятельной работе по физике для студентов-иностранцев подготовительного факультета/Сост. Е. И. Агеева, Г. И. Прокопова и др. - Харьков: НТУ «ХПИ», 1992. - 82 с.
6. Бондарь А. М., Чекарѐв М. А., Троицкая В. В. Физика: Метод, указания для студентов-иностранцев подготов. фак. - Харьков: Межвузовое полиграф, предприятие, 1990. - 126 с.
7. Гайдучок Г.М. та інші. Довідник з фізики для учнів/Г.М. Гайдучок, В.А. Лободюк, К.П. Рябошапка. - К.: Рад.школа, 1981. - 240 с.
8. Волькенштейн В. С. Сборник задач по общему курсу физики. - М.: Наука, 1985.
9. Гончаренко С. У. Методика навчання фізики в середній школі: Механіка. - К.: Рад. шк., 1984. - 208 с.
10. Бендриков Г.О., Буховцев Б.Б., Мякишев Г.Я. Задачі з фізики для вступників до вузів.- Київ: Вища школа, 1981. - 368 с.

Навчальне видання

Анатолій Дмитрович Слободяник
Петро Михайлович Зузяк

Курс фізики для підготовчого відділення іноземних студентів

Навчальний посібник

Оригінал-макет підготовлено Слободяником А.Д.

Редактор В.О. Дружиніна
Коректор З.В. Поліщук

Навчально-методичний відділ ВНТУ
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК №746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Підписано до друку
Формат 29,7x42 $\frac{1}{4}$
Друк різнографічний
Тираж __ прим.
Зам. №

Гарнітура Times New Roman
Папір офсетний
Ум. друк. арк.

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК №746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ