

Яблочкова К.С.

«Фізика з основами геофізики»

Конспект лекцій для студентів географічного
факультету

Це навчально-методичне видання є конспектом лекцій, що читаються в межах курсу «Фізика з основами геофізики» для студентів географічного факультету – 12 академічних годин лекцій і 24 академічні години практичних занять. Метою курсу є ознайомлення студентів з основними ідеями фізики, одночасне формування певного поняття про роль математики в описах цих ідей, та про застосування законів фізики в геофізичних дослідженнях.

Зміст

Вступ.	4
Лекція 1: Вимірювання у фізиці. Кінематика.	6
Лекція 2: Динаміка. Закони збереження.	18
Лекція 3: Молекулярна фізика та термодинаміка.	38
Лекція 4: Електрика.	55
Лекція 5: Магнітні явища та електромагнетизм.	66
Лекція 6: Оптика.	79
Лекція 7: Фізика атома.	90
Список рекомендованої літератури.	97

Вступ

Академічний тлумачний словник української мови визначає фізику як «науку про будову, загальні властивості та закони руху матерії». Фізика вивчає Всесвіт: з чого він складається, як його можна описати, як він себе поводить. Фізика намагається відповісти на велику кількість питань:

- Як почався Всесвіт?
- Як рухаються планети?
- Чому виникає веселка?
- Чому метал проводить струм, а дерево – ні?
- Яка найменша можлива часточка речовини?

Як ми дізнаємося відповіді на ці питання? Це можливо лише шляхом проведення наукового дослідження. Кожне наукове дослідження складається з наступних кроків.

- 1) Спостереження. Дослідження навколишнього світу. Визначення чогось, про що науковці хочуть дізнатися більше.
- 2) Пошук. Огляд наявних робіт інших дослідників.
- 3) Постановка питання. Науковці формують питання, на які можна відповісти за допомогою експерименту.
- 4) Формулювання гіпотези. Гіпотеза – це твердження, яке може бути перевіреним за допомогою експерименту.
- 5) Планування експерименту. Воно включає в себе вибір методів і матеріалів, визначення різних видів змінних, планування стадій експерименту.
- 6) Збір даних. На цьому етапі проводиться експеримент, виміри обов'язково проводяться декілька разів.
- 7) Формулювання висновків. Науковці аналізують дані. Вони вирішують, підтвердилася гіпотеза чи ні. Якщо ні, має бути висунута нова гіпотеза.

8) Комунікація. Результати дослідження і процедура його проведення мають бути презентовані так, щоб інші вчені могли повторити експеримент і порівняти отримані результати.

Якщо гіпотеза підтверджується багатократно, ми називаємо її **правилом** чи **законом**. Наприклад, відомі нам зі школи закони Ньютона – результат узагальнень багатьох експериментальних даних. Сукупність законів в певній області можуть бути узагальнені в **теорію**.

Як формуються закони? Іноді їх можна сформулювати якісно, словами. Наприклад, правило Бера стверджує, що «всі ріки, що течуть у меридіональному напрямі, у Північній півкулі підмивають правий берег, а в Південній — лівий». Однак такий опис природи недосконалий. Наскільки сильно ріки підмивають береги? Які ріки швидше підмивають берег? – на ці питання закон Бера не дає нам відповіді. Тому фізики користуються мовою математики. Це дозволяє сформулювати закон коротко і кількісно. Ось вираз для сили \vec{F} , що діє на річку маси m , яка рухається зі швидкістю \vec{v} по поверхні Землі, яка, в свою чергу, обертається з кутовою частотою $\vec{\omega}$:

$$\vec{F} = -2m[\vec{\omega} \times \vec{v}].$$

Як бачите, для формулювання фізичних законів необхідно бути знайомим із математичним поняттям «вектор» і «векторний добуток». Деякі закони ще більш складні: для їх математичного опису необхідно використовувати елементи вищої математики, диференційне чи інтегральне числення. Наприклад, як знайти масу об'єкта, чия густина в різних частинах об'єму – різна? Замість відомого зі школи виразу $m = \rho \times V$, необхідно просумувати добутки малих часток об'єкта об'ємами dV , кожна з яких має свою густину $\rho(V)$:

$$m = \int_V \rho dV$$

Лекція 1: Вимірювання у фізиці. Кінематика.

Світ навколо нас неймовірно різноманітний і складний, тому для його опису фізики користуються моделями – тобто спрощеними уявленнями про реальність. **Фізична модель** – уявлення тіла, явища або процесу, у якому ми розглядаємо лише такі їх параметри, які дозволяють отримати результати з заданою точністю.

Візьмемо, наприклад, поняття матеріальної точки. **Матеріальна точка** – об'єкт, розмірами якого нехтують в даних фізичних умовах. Так, можна вважати, що автомобіль, що рухається дорогою від Києва до Одеси, – матеріальна точка, бо розміри автомобіля малі у порівнянні з відстанню між містами. Навіть великі об'єкти – такі як планета Земля – у певних умовах можуть вважатися матеріальними точками (якщо ми розглядаємо, наприклад, рух Землі навколо Сонця). Ще одна модель – **фізичне тіло**. Фізичне тіло (надалі просто тіло) – це матеріальний об'єкт, що має постійну масу, постійну форму (причому, як правило, просту) та постійний об'єм.

Особливо важливою задачею є коректне представлення результатів дослідження. Уявімо, що декілька студентів проводили вимірювання довжини одного й того ж зошиту лінійками та отримали такі значення: 22,1 см, 22,0 см, 22,0 см та 22,3 см. Як записати довжину зошиту? 22,0 см; бо це найчастіше отримане значення? [22,0; 22,3] см? Якою ж є довжина зошита насправді?

Інструменти та органи чуття людини не є досконалими, а отже, треба оцінювати точність вимірів. Так, у 1999 році Національне Географічне Товариство США за допомогою системи GPS оцінило висоту Евересту як $8\,850\text{ м} \pm 2\text{ м}$. У 2005 урядом Китаю була оприлюднена інша оцінка, $8\,844,43 \pm 0,21\text{ м}$. В обох випадках виміряна величина подається з урахуванням похибки вимірювання.

Оцінка похибок вимірювання

Ось як можна оцінити похибку вимірювання.

Нехай x – істинне значення величини, а x_m – виміряне значення цієї величини. Введемо поняття **абсолютної похибки вимірювання**

$$\Delta x = x - x_m$$

та **відносної похибки вимірювання** $\delta x = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% = \frac{x - x_m}{x_m} \times 100\%$.

Похибка прямих вимірювань має дві складові: систематичну та випадкову.

Систематична складова пов'язана, зокрема, з недосконалістю вимірювальних пристроїв – інструментальною похибкою. Похибка вимірювання певним пристроєм вказується на самому пристрої, або у документації до нього. У випадку, коли ви не володієте спеціальною інформацією про інструментальну похибку певного інструменту, оцінити її дуже просто,

$$\Delta x_c = \frac{\text{ціна поділки}}{2}.$$

Так, ціна поділки звичайної лінійки складає 1 мм, отже, систематична похибка вимірювання довжини лінійкою складає 0,5 мм.

Випадкова похибка пов'язана з випадковим характером фізичних процесів, а також випадковими змінами умов вимірювань (шуми, вібрації). Для оцінки випадкової похибки необхідно провести наступні дії.

Нехай в результаті серії дослідів отримані значення $x_1, x_2 \dots x_n$.

Середнє арифметичне цих вимірів можна розрахувати як

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}.$$

Випадкову похибку вимірювання можна розрахувати як

$$\Delta x_{\varepsilon} = t_{\alpha,n} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \left[(x_1 - \langle x \rangle)^2 + (x_2 - \langle x \rangle)^2 + \dots + (x_n - \langle x \rangle)^2 \right]}.$$

Параметр $t_{\alpha,n}$ має назву «коефіцієнт Стюдента». $\alpha = 0,95$ означає, що з ймовірністю 95% істинне значення величини знаходиться у межах інтервалу, визначеному розрахованою похибкою. Значення $t_{\alpha,n}$ міститься у таблицях коефіцієнтів Стюдента.

Знаючи систематичну та випадкову складові похибки, можна знайти її величину

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_{\varepsilon})^2 + (\Delta x_{\varepsilon})^2}.$$

На жаль, здебільшого ми вимушені визначати досліджувані величини непрямым шляхом. Нехай величина f , похибку якої необхідно оцінити, розраховується як добуток аргументів x , y та z , абсолютні похибки яких вже визначені (Δx , Δy , Δz).

Тоді відносна похибка вимірювання f знаходиться за формулою

$$\delta f = \delta x + \delta y + \delta z = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y} + \frac{\Delta z}{z}.$$

Тобто, якщо ви дізналися, що похибка вимірювання довжини зошита складає 1%, а похибка ширини і товщини – по 2% кожна, ви зможете знайти об'єм зошита з похибкою $1 \% + 2 \% + 2 \% = 5 \%$.

Механіка. Основи кінематики

Розділ фізики, який вивчає рух тіл, називається **механікою**. Якщо вас цікавить, чому саме тіла рухаються, ви маєте вивчати динаміку, а якщо цікавить лише те, як вони рухаються, то кінематику.

Що мається на увазі під питанням: «Як тіла рухаються?» По-перше, ми маємо знати, де в певний момент часу знаходиться тіло. Для цього нам необхідно вибрати систему відліку.

Система відліку – це сукупність матеріальних точок, нерухомих одна щодо одної, відносно яких розглядається механічний рух, годинників, що відлічують час, та системи координат.

Системи відліку можуть бути найрізноманітнішими. Так, наприклад, коли хтось говорить: «На світанку корабель знаходився в одній милі від берега» – вони використовують берег як сукупність матеріальних точок, відносно яких задається положення корабля, а цикл день-ніч – у якості годинника. В іншій системі відліку ми могли б сказати, що в момент часу $t = 0$ с корабель знаходився в точці з координатами $x = 0,0$ м, $y = 1852,0$ м, і на висоті $z = 0$ м над рівнем моря.

Нам також може бути цікава **траєкторія** матеріальної точки, тобто лінія, яку вона описує в просторі під час руху. Математично траєкторію руху в площині у прямокутній системі координат можна описати за допомогою рівняння $y(x)$. Наприклад, траєкторію точки, що рухається по колу одиничного радіуса, можна описати як: $x^2 + y^2 = 1$.

Для спрощення будемо розглядати рух тіла лише вздовж однієї прямої. Тоді **положення** тіла (тобто те, де воно знаходиться в певний момент часу) можна задати лише однією координатою $x = x_1$.

Основною задачею механіки є визначення положення тіла в будь-який момент часу. Інакше кажучи, ми маємо скласти рівняння руху тіла, залежність його положення x від t (кажемо, що положення – це функція часу). Ось приклад рівняння руху: $x = 2 + 3t$. Підставляючи різні значення часу, можемо дізнатися, де саме при цьому знаходилося тіло.

Якщо тіло не стоїть на місці, а рухається, воно здійснює **переміщення**

$$\Delta x = x_2 - x_1 .$$

Ця величина вимірюється у метрах.

Довжина траєкторії тіла – шлях. Якщо тіло перемістилося з точки з координатою $x = 1$ м в точку з координатою $x = 11$ м і потім знову повернулося в початкову точку з координатою $x = 1$ м, то її шлях складає 20 метрів, а переміщення – 0 метрів. Переміщення може бути як додатним, так і від'ємним; шлях – завжди додатна величина.

Щоб зрозуміти, наскільки швидко рухалося тіло, необхідно ввести поняття швидкості. **Середня швидкість тіла** v_x – це його переміщення за певний проміжок часу. Швидкість вимірюється в метрах на секунду (м/с).

$$\langle v_x \rangle = \frac{\Delta x}{\Delta t}.$$

Тут Δx – переміщення, здійснене за інтервал часу Δt .

Але середня швидкість не дає нам можливості зрозуміти, як швидко рухається тіло в даний момент часу (тобто яке мале переміщення воно здійснює за дуже маленький проміжок часу), ми не знаємо миттєву швидкість тіла. На порятунок приходить диференціальне числення

$$v_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} = x'.$$

Миттєва швидкість тіла – це відношення переміщення, яке тіло здійснює за дуже маленький проміжок часу, до тривалості цього проміжку часу. Математично, це похідна від положення тіла як функції часу. Наведене позначення похідної x' , хоча більш звичне для вас, але застосовується в механіці значно рідше, ніж $\frac{dx}{dt}$.

Якщо швидкість тіла не змінюється з часом, такий рух називається **рівномірним**. Ми можемо отримати рівняння руху тіла при рівномірному русі зі сталою швидкістю u .

$$\frac{dx}{dt} = v_x = u$$

Розділяючи змінні,

$$dx = u dt$$

Інтегруємо від початкового положення тіла x_0 в момент часу $t = 0$ до положення тіла x в момент часу t .

$$\int_{x_0}^x dx = \int_0^t u dt$$

Отримуємо

$$x - x_0 = ut$$

Кінцевий вираз, який дозволяє нам отримати значення x для будь-якого t має вигляд

$$x = x_0 + ut$$

Випадків руху тіла зі сталою швидкістю небагато, швидкість руху з часом може змінюватися. Для опису руху тіла зі змінною швидкістю використовуємо поняття прискорення.

За аналогією, **середнє прискорення** тіла a_x — це зміна його швидкості за певний проміжок часу. Прискорення вимірюється в метрах за секунду за секунду, тобто в м/с^2 .

$$\langle a_x \rangle = \frac{\Delta v_x}{\Delta t}.$$

Миттєве прискорення, за аналогією можна ввести як

$$a_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = v_x' = x''.$$

Миттєве прискорення тіла — зміна швидкості тіла за дуже малий проміжок часу. Це похідна від швидкості тіла як функції часу та одночасно друга похідна від положення тіла як функції часу.

Якщо тіло рухається зі сталим прискоренням, такий рух називають **рівноприскореним**. Ми можемо отримати рівняння руху тіла при рівноприскореному русі зі початковою швидкістю u і сталим прискоренням a

$$a_x = \frac{dv_x}{dt}$$

Розділяючи змінні,

$$dv_x = a_x dt$$

Інтегруємо від початкової швидкості в момент часу $t = 0$ до швидкості тіла v_x в момент часу t .

$$\int_u^{v_x} dv_x = \int_0^t a_x dt$$

Отримуємо $v_x - u = a_x t$

$$v_x = u + a_x t$$

Згадуємо, що

$$\frac{dx}{dt} = v_x$$

Тобто

$$\frac{dx}{dt} = v_x = u + a_x t$$

Розділяємо змінні

$$dx = (u + a_x t) dt$$

Інтегруємо від початкового положення тіла x_0 в момент часу $t = 0$ до положення тіла x в момент часу t .

$$\int_{x_0}^x dx = \int_0^t (u + a_x t) dt$$

Отримуємо після інтегрування

$$x - x_0 = ut + \frac{1}{2} a_x t^2$$

або

$$x = x_0 + ut + \frac{1}{2} a_x t^2$$

Ми знову отримали рівняння руху тіла, тобто спосіб визначити положення тіла, що рухається зі сталим прискоренням, в будь-який момент часу.

Рух тіла може відбуватися і зі змінним прискоренням. У цьому випадку рівняння руху тіл буде більш складним. Наприклад,

рівняння руху тіла, яке підвішене до вертикальної пружинки і здійснює коливання, можна виразити як

$$x = A \cos(\omega t).$$

Тут A і ω – сталі додатні константи.

Можна переконатися, взявши першу та другу похідні, що і швидкість, і прискорення такого тіла теж змінюються з часом,

$$v_x = -A\omega \sin(\omega t) \text{ і } a_x = -A\omega^2 \cos(\omega t).$$

Прямолінійний рух – найпростіший вид руху. Можна розглядати рух і в декількох напрямках одночасно, тобто рух з більш складною траєкторією. У такому випадку положення тіла, його переміщення, швидкість і прискорення задаються векторами. Всі рівняння зберігають свою силу, але тепер, крім виразів для x , v_x , a_x , додаються вирази, що описують рух в інших напрямках: y , v_y , a_y та z , v_z , a_z .

В такому випадку ми кажемо, що положення, переміщення, швидкість і прискорення – це вектори, у них є величина та напрямок. Записувати вектори зручно за допомогою їх координат. Так, положення тіла можна записати як

$$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j},$$

тут \vec{i} та \vec{j} – одиничні вектори в горизонтальному та вертикальному напрямках. Вектор, чий початок знаходиться на початку координат, а кінець – в точці (x, y) , називають **радіус-вектором тіла** (рис. 1.1).

Аналогічно вектор швидкості записується як $\vec{v} = v_x\vec{i} + v_y\vec{j}$, а вектор прискорення як $\vec{a} = a_x\vec{i} + a_y\vec{j}$. Рух вздовж різних осей незалежний один від одного. Так, тіло може рухатися рівномірно вздовж одного з напрямків і рівноприскорено – вздовж іншого. Наприклад, тіло, що кинули під кутом до горизонту поблизу поверхні Землі, рухається рівномірно вздовж горизонтального напрямку і рівноприскорено – у вертикальному напрямку. Результируюча траєкторія руху такого тіла представляє собою параболу.

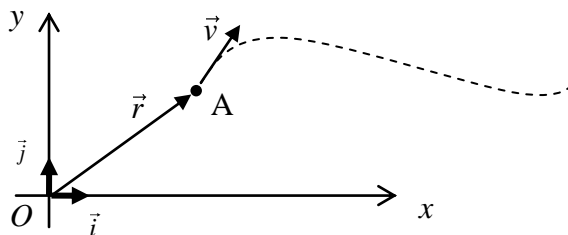


Рис. 1.1 Частинка А знаходиться в точці з радіус-вектором \vec{r} і має вектор швидкості \vec{v} . Вектор швидкості дотичний до її траєкторії (пунктирна лінія)

Розглянемо рух тіла по колу зі сталим модулем швидкості. Використання таких величин як переміщення, швидкість та прискорення у тому вигляді, в якому вони були введені для опису поступального руху, не є зручним.

Як видно з рисунку 1.2, за один і той же час різні точки тіла (позначені кружечками) переміщуються на різну відстань з різною швидкістю. Однак, очевидно, що за рівні проміжки часу вони замітають один і той же кут.

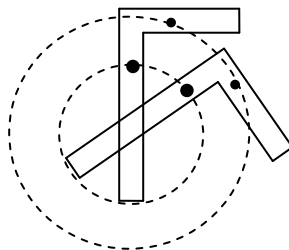


Рис. 1.2 Обертальний рух

Тому для опису обертального руху використовують поняття кутового положення. **Кутове положення** – кут, відрахований проти

годинникової стрілки, який радіус-вектор матеріальної точки складає з додатнім напрямком вісі x . Одиниця вимірювання – **радіан**. Знайти кутове положення матеріальної точки у радіанах можна, розділивши довжину дуги, що стягує цей кут, на радіус кола, по якому рухається точка (рис. 1.3(а)):

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta L}{R}$$

Означення радіана: довжина дуги кола одиничного радіуса, що стягує певний кут, чисельно дорівнює величині цього кута, вираженого у радіанах.

$$1 \text{ рад} = \left(\frac{180}{\pi} \right)^\circ \approx 57^\circ$$

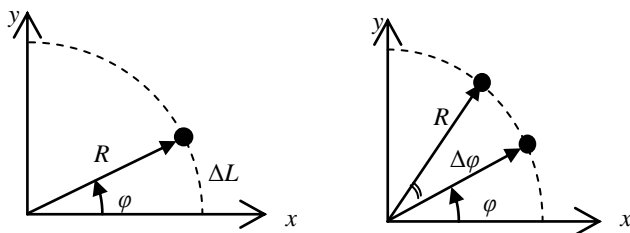


Рис. 1.3 (а) Кутове положення матеріальної точки, (б) кутове переміщення матеріальної точки

Тіло здійснює **кутове переміщення** за певний час. Зміну кутового положення тіла з часом t характеризує його кутова швидкість.

Середня кутова швидкість тіла

$$\langle \omega \rangle = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \cdot (\text{рад/с})$$

Ми можемо також ввести і **миттєву кутову швидкість** – відношення кутового переміщення до нескінченно малого проміжку часу:

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{d\varphi}{dt} = \varphi'$$

Кутова швидкість тіла – це вектор. Його напрямок визначається за правилом правого гвинта (див. рис. 1.4)

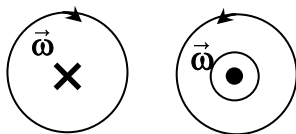


Рис. 1.4 Напрямок вектора $\vec{\omega}$

Якщо тіло обертається рівномірно, час одного оберту є сталою величиною. Час одного оберту називається **періодом обертання** T (с). Величина обернена до періоду – **частота** – показує, скільки обертів тіло здійснює за секунду. вимірюється у $1/\text{с}$, с^{-1} .

$$\nu = \frac{1}{T},$$

Для тіла, що обертається рівномірно, між кутовою швидкістю і частотою існує наступний зв'язок:

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

Для нерівномірного обертального руху – тобто такого руху, при якому за однакові проміжки часу тіло обертається на різні кути, – можна ввести поняття **кутового прискорення**

$$\beta = \frac{d\omega}{dt} \text{ (рад/с}^2\text{)}.$$

Але чи є у тіла прискорення, якщо воно рівномірно обертається?

Прискорення – це векторна величина; вона характеризується як величиною, так і напрямком. При обертанні тіла *величина* вектора швидкості може залишатися сталою, але його *напрямок* весь час змінюється. Тому, навіть якщо тіло обертається рівномірно, воно має так зване **доцентрове (нормальне) прискорення**. Величина нормального прискорення визначається з наступного виразу

$$a_n = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R$$

Тут R – радіус кола, за яким обертається тіло.

Нормальне прискорення направлено до центру кола, по якому обертається матеріальна точка. На рисунку 1.5 показана матеріальна точка, що рухається по колу зі сталою за модулем швидкістю. Вектор швидкості цієї точки завжди направлений по дотичній до кола. За час Δt він змінює своє значення від \vec{v}_1 до \vec{v}_2 . Оскільки $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{\Delta t}$, напрямком вектора \vec{a} буде співпадати з напрямком вектора $\vec{v}_2 - \vec{v}_1$. З рисунка 1.5 видно, що ця різниця направлена до центру кола, по якому рухається матеріальна точка. А отже доцентрове прискорення заслужено носить таку назву.

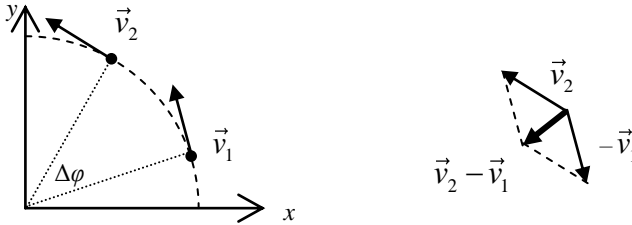


Рис. 1.5 До визначення напрямку нормального прискорення

Лекція 2: Динаміка. Закони збереження.

Сила – міра взаємодії між тілами. Простими словами: коли тіло щось штовхає чи тягне, на нього діє сила. Сила є причиною зміни руху: початку руху, його кінця, зміни напрямку руху. Сила – це векторна величина; вимірюється вона в ньютонах. 1 ньютон – сила, з якою діє на вашу руку невеликого розміру яблуко (масою біля 100 г), яке ви тримаєте в руках. Сили можуть діяти при контакті між тілами, а можуть і на відстані.

Основою динаміки є три закони Ньютона, сформульовані англійським вченим Ісааком Ньютоном у роботі: «Математичні начала матеріальної філософії» в 1687 році. Розглянемо ці закони.

Перший закон Ньютона: існують такі системи відліку, в яких матеріальна точка, на яку не діють сили, рухається рівномірно і прямолінійно, поки дія інших тіл не змусить її змінити свій стан. Такі системи відліку називаються інерціальними.

Здатність тіла зберігати незмінною свою швидкість відносно інерціальних систем відліку називають **інертністю** тіла. Кількісна характеристика інертності тіла – його **маса**.

Другий закон Ньютона: в інерціальних системах відліку прискорення матеріальної точки прямо пропорційне силі, що діє на точку, і обернено пропорційне її масі. Математично цей закон часто записується як:

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

З другого закону Ньютона випливає, що якщо сума сил, що діє на матеріальну точку, дорівнює нулю

$$\sum \vec{F} = 0,$$

така матеріальна точка буде рухатися без прискорення, прямолінійно зі сталою швидкістю, або знаходитися у стані спокою.

Шайба, що лежить на горизонтальній поверхні, знаходиться під дією двох сил, чия векторна сума дорівнює нулю (рис. 2.1а). Вона буде залишатися у стані спокою, поки на неї не буде діяти ще одна сила. Якщо шайба вже ковзає по поверхні з певною швидкістю, вона буде продовжувати ковзати з цією ж швидкістю за відсутності сил, які б змушували її зупинитися.

Шайба, що ковзає вниз по схилу, знаходиться під дією двох сил: сили тяжіння та нормальної реакції, чия векторна сума не дорівнює нулю (рис. 2.1б). Шайба буде ковзати схилом із постійним прискоренням.

Третій закон Ньютона: сили, з якими матеріальні точки діють одна на одну, є рівними за величиною, протилежними за напрямком, і діють вздовж прямої, що з'єднує ці точки. Математично цей закон часто записується як

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

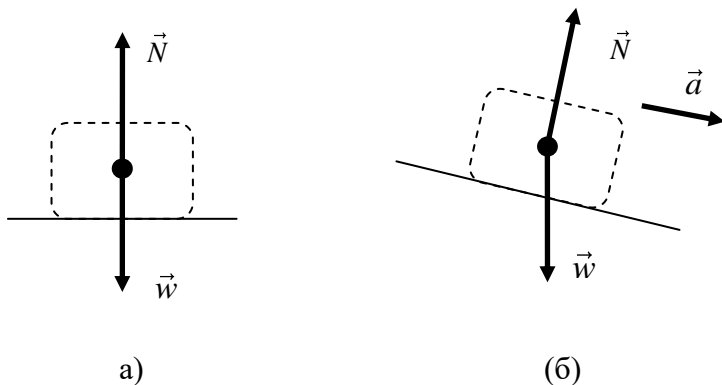


Рис. 2.1 Силкові діаграми матеріальних точок: (а) нерухома шайба на горизонтальній поверхні, (б) шайба, що рухається з прискоренням вздовж похилої площини

(Сила, з якою перша матеріальна точка діє на другу, дорівнює силі, з якою друга матеріальної точки діє на першу, але протилежна за напрямком). Коли ви вдаряєте рукою по стіні, ви дієте на неї з силою. Водночас стіна діє на вашу руку з такою ж за величиною силою. Що сильніше ви вдарите стіну, то сильніше вона вдарить вас.

Розглянемо деякі приклади сил, що існують в природі.

Сила всесвітнього тяжіння – сила, що діє між будь-якими двома точковими масами. Згідно з законом всесвітнього тяжіння, сила, що діє між двома матеріальними точками, прямо пропорційна добутку мас і обернено пропорційна квадрату відстані між ними.

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$

або для модуля сили

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

Тут $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$ – це константа, що носить назву «гравітаційна стала».

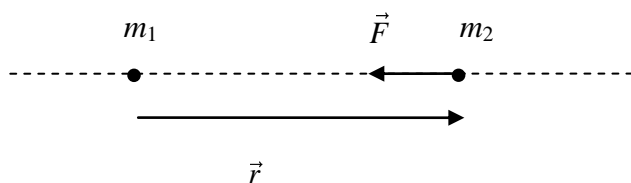


Рис. 2.2 Напрямок сили всесвітнього тяжіння \vec{F} , з якою матеріальна точка масою m_1 діє на матеріальну точку масою m_2 .

Коли йдеться про величину сили всесвітнього тяжіння між тілом біля поверхні Землі та самою Землею, використовують спрощений вираз, а саму силу називають «сила Земного тяжіння» чи просто «сила тяжіння».

$$F = G \frac{mM_z}{R^2} = m \left(\frac{GM_z}{R^2} \right) = mg$$

У формулі M_z – маса Землі, R – її радіус. Видно, що одиниці вимірювання величини g – м/с^2 , тож це є прискорення вільного падіння, тобто прискорення, з яким падає тіло, випущене над поверхнею Землі.

Величина прискорення вільного падіння біля поверхні Землі приблизно дорівнює $9,8 \text{ м/с}^2$. Однак в різних місцях земної кулі g приймає трохи різне значення. Відстань від центру Землі до різних точок поверхні, як відомо, менша на полюсах, тож там значення g досягає $9,83 \text{ м/с}^2$. На екваторі його значення зменшується до $9,78 \text{ м/с}^2$ (рис. 2.3). Крім форми Землі, на значення g впливають й інші фактори: обертання Землі та вміст надр нашої планети.

Прискорення вільного падіння також зменшується при віддаленні тіла від поверхні Землі. Так, на Міжнародній космічній станції, на висоті 408 км, прискорення вільного падіння складає приблизно $8,5 \text{ м/с}^2$.

Вимірювання прискорення вільного падіння в різних точках земної кулі є важливим геофізичним методом, що допомагає встановити розподіл маси у земній корі. Знати цей розподіл дуже важливо з багатьох причин. Наприклад, це дає можливість встановити рельєф місцевості, що схований під товщею льоду. Наявність гравітаційних аномалій також може свідчити про залягання певних порід під поверхнею Землі.

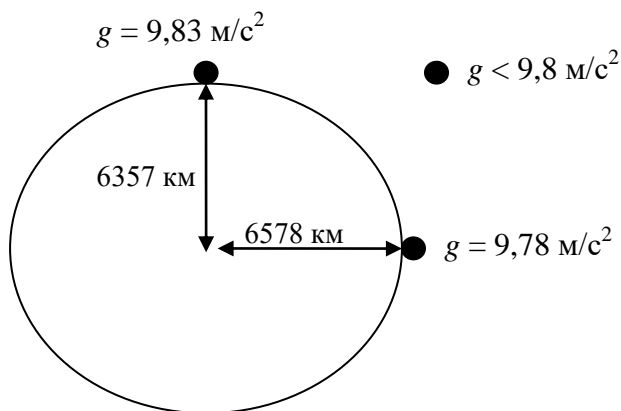


Рис. 2.3 Прискорення вільного падіння в різних точках Земної кулі

Яким чином вимірюється g ? За допомогою гравіметра. Найпростіший гравіметр вимірює час падіння малої маси у вакуумі зі сталої висоти.

Карти прискорення вільного падіння в різних точках земної кулі складають також досліджуючи орбіти супутників Землі. Через неоднорідне розташування маси по планеті Земля орбіта супутника трохи відрізняється від ідеально колової. Форму орбіт вимірюють за допомогою лазерних далекомірів. Потужний лазер випускає сигнал у спеціально запущений супутник, вкритий дзеркальцями. Приймач лазерного випромінювання фіксує відбитий від супутника сигнал, дозволяючи виміряти час, за який світло пройде шлях до супутника і назад. Такі дослідження проводять, зокрема, 48 лабораторій під керівництвом НАСА у проєкті International Laser Ranging Service. Деякі з цих лабораторій розташовані і в Україні.

Сили пружності – це сили, що протидіють зміні форми (деформації) тіл. Сили пружності опираються деформації та намагаються

повернути тілу його початкову форму. Природа сил пружності – міжмолекулярна взаємодія між частинкам речовини.

Приклавши силу до тіла, його можна розтягнути. Якщо після припинення дії сили, тіло залишається деформованим, така деформація – **пластична**. Якщо ж тіло повертається до своєї початкової форми, то така деформація – **пружна**. Розглянемо закони пружної деформації тіла.

Нехай тіло мало довжину l_0 і було розтягнуте до довжини l (рис. 2.4). Назвемо її абсолютною деформацією

$$\Delta l = l - l_0$$

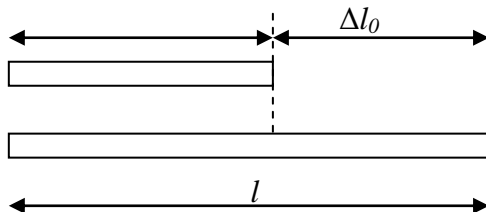


Рис. 2.4 Визначення абсолютної деформації

Англійський вчений Роберт Гук встановив, що пружні сили прямо пропорційні абсолютній деформації тіл.

Математично цей закон можна описати так:

$$F = k\Delta l.$$

Коефіцієнт пружності k різний для тіл різної форми та розмірів, навіть таких, що виготовлені з одного і того ж матеріалу. Тому зручніше оперувати поняттями **механічного напруження** (сила, прикладена до одиниці площі)

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

та відносної деформації

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

Закон Гука стверджує, що

$$\sigma = E\varepsilon,$$

де E – константа, яка характеризує пружність даного матеріалу, – модуль Юнга.

Модуль Юнга – це таблична величина, її значення відоме як для промислових матеріалів, так і для гірських порід. Наприклад, для сталі він складає від 190×10^9 до 210×10^9 Н/м², базальту 73×10^9 Н/м², граніту – від 10×10^9 до 70×10^9 Н/м², а для піщаного ґрунту – від 10×10^9 до 50×10^9 Н/м².

Закон Гука працює тільки у випадку невеликих пружних деформацій. При значних деформаціях, залежність відносної деформації від механічного напруження є більш складною. Однак для кожної речовини її можна визначити експериментально. Типовий графік залежності механічного напруження від відносної деформації металів наведено на рис. 2.5.

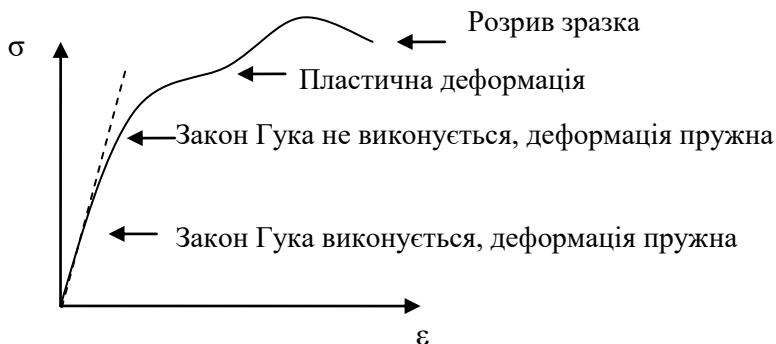


Рис. 2.5 Залежність механічної напруженості від відносного видовження у широких межах типового металу

Знаючи величину деформації певної породи (що залягає складками), можна дізнатися про величини сил, що на неї діють. Маючи невідомий матеріал і стискаючи його певною силою, можна визначити його модуль Юнга і зробити певні висновки про його склад. Знаючи матеріал породи, можна також оцінити, які сили призведуть до її руйнування в сейсмічно активних зонах.

Нормальна реакція опори – пружна сила, що діє з боку опори на тіло, не дозволяючи йому проникнути вглиб опори. «Нормальний» – означає «перпендикулярний»; ця сила завжди діє перпендикулярно до опори. Нормальна реакція опори викликана взаємодією між частинками тіл, що дотикаються (рис. 2.6(a)).

Сили опору, тертя – сили, що діють у напрямку, протилежному від напрямку руху тіла, на границі тіло-оточення.

Тертя – це опір з боку твердих тіл. Якщо тіло не рухається, то сила тертя є меншою за силу нормальної реакції опори, помножену на коефіцієнт μ_{cn} .

$$f \leq \mu_{cn} N,$$

μ_{cn} – коефіцієнт тертя спокою. Сила тертя спокою рівна за величиною силі, що намагається привести тіло у рух (рис. 2.6(б)).

Якщо тіло вже рухається з невеликою швидкістю, то сила тертя стала і пропорційна силі нормальної реакції опори.

$$f = \mu_k N,$$

де μ_k – коефіцієнт тертя ковзання. І μ_{cn} , і μ_k залежать від комбінації матеріалів, що взаємодіють. Їх значення знаходяться з таблиць.

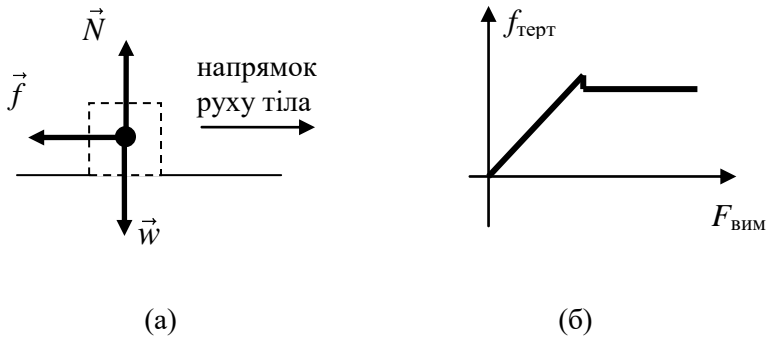


Рис. 2.6 (а) Сила нормальної реакції \vec{N} , сила тертя \vec{f} та сила тяжіння \vec{W} ; (б) Залежність сили тертя $f_{\text{терт}}$ від вимушуючої сили $F_{\text{вим}}$.

Сила Архімеда

Будь-яке тіло, що занурене у рідину, відчуває на собі виштовхувальну силу, що називають силою Архімеда. Чисельно для тіла об'ємом V , зануреного у рідину густини ρ , сила Архімеда дорівнює

$$F = \rho g V.$$

Породи Землі, хоч і тверді, теж характеризуються певною плинністю. Розрахунок сили Архімеда допомагає оцінити, як буде поводити себе гора (просідати чи знаходитися у рівновазі з оточенням), якщо вона оточена породою іншої густини.

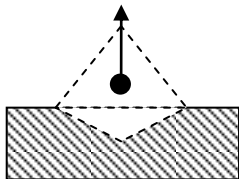


Рис. 2.7 Сила Архімеда виштовхує занурене у рідину тіло

Сили інерції (сили в неінерціальних системах відліку)

Якщо система відліку рухається з прискоренням, спостерігач всередині цієї системи відчуває дію на себе сил. Так, маятник підвішений до стелі автомобіля, відхиляється назад, коли автомобіль прискорюється (рис. 2.8).

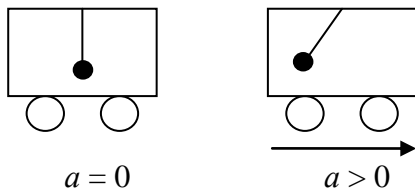


Рис. 2.8 Маятник відхиляється, коли автомобіль прискорюється

Планету Земля можна вважати інерціальною системою відліку у випадках, коли рух тіла розглядається впродовж невеликого проміжку часу, хвилин чи годин. Оскільки наша планета обертається навколо власної вісі, при розгляді більш тривалих процесів можуть проявлятися ефекти, що свідчать про неінерціальність цієї системи.

Сила Кориоліса – одна з сил інерції, що існує в системі відліку, яка обертається, і виявляється при русі в напрямі під кутом до осі обертання. Якщо $\vec{\omega}$ – вектор кутової швидкості обертання Землі, \vec{v} – вектор швидкості руху тіла маси m по поверхні Землі, то сила Кориоліса знаходиться за формулою:

$$\vec{F}_k = -2m[\vec{\omega} \times \vec{v}]$$

Квадратними дужками позначено векторний добуток векторів $\vec{\omega}$ і \vec{v} . Величина цього вектору становить

$$F_k = 2m\omega v \sin \alpha .$$

тут α – кут між вектором швидкості тіла та віссю обертання Землі,

Внаслідок дії сили Кориоліса один з берегів річок завжди підмитий. За так званим правилом Бера, ріки, що протікають в Північній півкулі, підмивають правий берег, а ті, що протікають в Південній, – лівий (рис. 2.9).

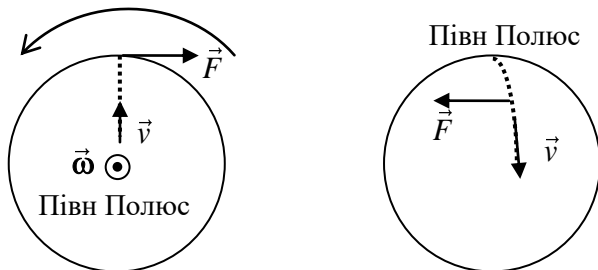


Рис. 2.9 Сила Кориоліса: на ріку, що протікає в північній півкулі зі швидкістю \vec{v} (позначена пунктиром), діє сила \vec{F} , направлена зі сходу на захід.

Динаміка обертального руху

Для опису здатності сили спричинювати зміну обертального руху.

вводять величину, що називається моментом сили. **Моментом сили** називають векторний добуток вектора \vec{r} , що має початок в точці, навколо якої відбувається обертання, і кінець у точці, до якої прикладена сила, на вектор сили \vec{F}

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

Величина моменту сили дорівнює

$$M = F \cdot r \cdot \sin \alpha,$$

де α – кут між векторами \vec{r} та \vec{F} . Одиниця вимірювання – Н·м.

Напрямок моменту сили (як і напрямок результату будь-якого іншого векторного добутку двох векторів) можна встановити за правилом правої руки. Якщо загинати чотири пальці правої руки від напрямку першого вектору в добутку (\vec{r}) до напрямку другого вектору в добутку (\vec{F}), то відставлений великий палець цієї руки вкаже на напрямок результату добутку векторів. З рис. 2.10 можна впевнитися, що, якщо ви виставите долоню правої руки так, щоб пальці вказували вправо, як вектор \vec{r} , і загнете їх вниз за напрямком вектора \vec{F} , то великий палець цієї руки буде направлений перпендикулярно площині малюнку, у напрямку від читача.

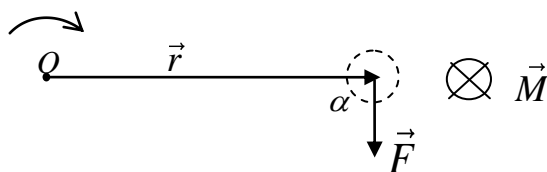


Рис. 2.10 Сила \vec{F} створює момент сили \vec{M} , що призводить до обертання тіла (зображене пунктиром) навколо точки O . Момент сили направлений перпендикулярно площині малюнку, від читача

Знаючи про обертальний момент сил, можна пояснити явище гальмування обертання Землі. Експериментально порівнюючи час сонячних і місячних затемнень, що збереглися з доби давнього Вавилону, вчені підтвердили факт гальмування обертання Землі.

Через гравітаційну дію Місяця рівень води у Світовому Океані підвищується одночасно з двох боків планети (явище припливів). Через сили тертя вісь, що з'єднує максимуми припливів, не збігається з віссю Земля-Місяць, а складає з нею кут $2,9^\circ$.

Внаслідок цього, (рис. 2.11) сила з боку припливу \vec{F}_1 створює момент сили, що розкручує Землю за годинниковою стрілкою, а менша за величиною сила з боку припливу \vec{F}_2 створює момент, що розкручує Землю у протилежний бік. Сумарно ці сили створюють момент сили, що намагається розкрутити Землю за годинниковою стрілкою, тобто у бік, протилежний до напрямку обертання Землі як цілого, гальмуючи її. Швидкість гальмування Землі становить 2,4 мілісекунди на століття.

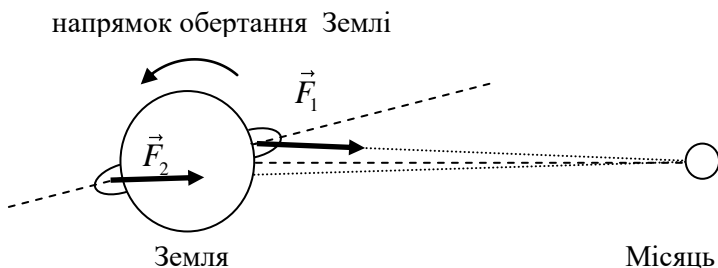


Рис. 2.11 Явище уповільнення обертання Землі

Величина, що характеризує інертні властивості тіла при обертанні, – **момент інерції**. Ця величина пропорційна масі тіла і залежить від того, як саме тіло розташовано відносно вісі обертання.

Для матеріальної точки масою m , що обертається навколо нерухомої вісі на відстані r від неї, момент інерції становить

$$I = mr^2.$$

Для протяжних тіл (тіл з розподіленою масою) вираз для моменту інерції може бути розрахований. Одиниця вимірювання моменту інерції – $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Дія моменту сили M на тіло, що характеризується моментом інерції I , призводить до пришвидшення чи сповільнення обертання цього тіла відносно певної вісі, тобто до руху тіла з кутовим прискоренням β

Співвідношення

$$I\beta = M$$

визначає зв'язок між цими величинами і носить назву **основного рівняння динаміки обертального руху**.

Закони збереження у фізиці

З одним зі законів збереження – законом збереження маси (Лавуазьє, Ломоносов) – ви вже знайомі. «Маса речовин, що вступають в реакцію, завжди дорівнює масі речовин, які утворюються в результаті реакції». Познайомимося з іншими законами збереження та величинами, що **зберігаються**, тобто чиє значення залишається сталим в часі.

1. Імпульс. Закон збереження імпульсу.

Імпульс – векторна величина, що чисельно дорівнює добутку маси тіла на його швидкість:

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

Одиниця вимірювання імпульсу – $\text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}$ або $\text{Н}\cdot\text{с}$.

За допомогою цієї величини, вважаючи, що маса тіла не змінюється, можна сформулювати другий закон Ньютона.

$$\vec{F} = m\vec{a} \Leftrightarrow \vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} \Leftrightarrow \vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} \quad \vec{F} = \frac{d(\vec{p})}{dt}.$$

Візьмемо замкнену систему, що складається з двох тіл (рис. 2.12).

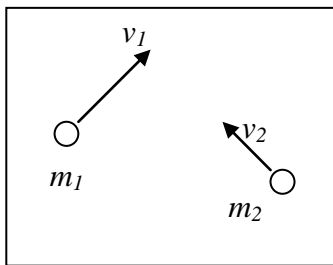


Рис. 2.12 До закону збереження імпульсу

Замкнена система – це сукупність тіл, які не взаємодіють із зовнішнім середовищем, тобто можуть взаємодіяти лише один з одним.

Нехай ці тіла зіткнулись. Запишемо 2-й закон Ньютона для кожного зіткнення:

$$\vec{F}_{12} = \frac{d\vec{p}_2}{dt} \quad \text{і} \quad \vec{F}_{21} = \frac{d\vec{p}_1}{dt}$$

Склавши обидва рівняння, отримуємо

$$\vec{F}_{12} + \vec{F}_{21} = \frac{d\vec{p}_2}{dt} + \frac{d\vec{p}_1}{dt}$$

Але, за третім законом Ньютона,

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

тому

$$\frac{d\vec{p}_2}{dt} + \frac{d\vec{p}_1}{dt} = 0$$

Перетворюємо ліву частину рівняння

$$\frac{d\vec{p}_2}{dt} + \frac{d\vec{p}_1}{dt} = \frac{d}{dt}(\vec{p}_1 + \vec{p}_2).$$

Якщо

$$\frac{d}{dt}(\vec{p}_1 + \vec{p}_2) = 0,$$

то обов'язково

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \text{const}$$

Тобто, незважаючи на те, що імпульси кожного з тіл змінюються при зіткненні, сума цих імпульсів з часом не змінюється – вона залишається сталою.

Можна показати, що останній вираз справедливий не тільки для двох тіл, а і для будь-якої кількості тіл, що складають замкнену систему.

Вираз

$$\sum_i \frac{d\vec{p}_i}{dt} = 0 \text{ або } \sum_i \vec{p}_i = \text{const}$$

носить назву **закону збереження імпульсу**. Він стверджує, що повний імпульс замкненої системи тіл зберігається.

Які ж приклади закону збереження імпульсу в природі?

Виконання закону збереження імпульсу можна спостерігати як віддачу зброї, з якої вилітає куля. Оскільки початковий імпульс системи куля-зброя дорівнює нулю, після пострілу він також має

залишатися нулем, тому зброя починає рух у напрямку, протилежному від руху кулі.

2. Робота і енергія. Закон збереження енергії

Енергія – універсальна кількісна міра різних форм руху і взаємодії матерії. Коли тіла обмінюються енергією, в них відбувається певна зміна. Кількісна характеристика міри обміну тілами енергією – робота. **Робота**, що виконується сталою силою \vec{F} по переміщенню тіла на $\Delta\vec{r}$, якщо кут між цими векторами складає θ , дорівнює

$$A = \vec{F} \cdot \Delta\vec{r} = F \cdot \Delta r \cdot \cos \theta$$

У випадку, коли сила, що діє на тіло, змінюється з часом – є функцією часу $F(t)$ – робота цієї сили може бути знайдена шляхом інтегрування

$$A = \int_{r_1}^{r_2} F(t) \cos \alpha dr$$

тут $\Delta r = r_2 - r_1$, (рис. 2.13).

Одиниця вимірювання роботи Н·м або Дж, джоуль.

Робота – скалярна величина, вона може приймати додатні і від’ємні значення. Якщо $\theta < 90^\circ$, тіло отримує енергію в процесі виконання роботи і $A > 0$. Якщо $\theta > 90^\circ$, тіло втрачає енергію в процесі виконання роботи і $A < 0$.

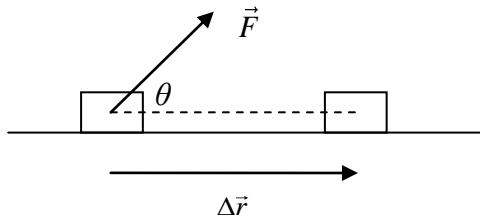


Рис. 2.13 Сила, в результаті дії якої тіло переміщується, виконує роботу

Кінетична енергія – енергія, яку тіло має завдяки руху.

Отримаємо вираз для кінетичної енергії. Нехай в результаті дії сили у певному напрямку, тіло здійснює переміщення у цьому ж напрямку. Тоді робота, яку виконує ця сила:

$$A = \int_{r_1}^{r_2} F dr = \left| \begin{array}{l} \text{другий закон} \\ \text{Ньютона} \end{array} \right| = \int_{r_1}^{r_2} m a dr = \int_{r_1}^{r_2} m \frac{dv}{dt} dr =$$
$$= \int_{r_1}^{r_2} m (dv) \frac{dr}{dt} = \int_{v_0}^v (mv) dv$$

Інтегруємо від початкової до кінцевої швидкості тіла

$$A = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}$$

Вираз

$$E_K = \frac{mv^2}{2}$$

називаємо **кінетичною енергією** тіла.

Потенціальна енергія – механічна енергія системи тіл, яка визначається їх взаємним розташуванням. Робота над тілом призводить до вивільнення (зменшення) потенціальної енергії:

$$A = -\Delta U$$

Не усі види взаємодії можуть надавати тілу потенціальну енергію. Про потенціальну енергію можна говорити тільки в тих видах взаємодії, де діють консервативні сили. **Консервативні сили** – сили, робота яких по замкненій траєкторії дорівнює нулю. Консервативні сили залежать лише від положення тіла в просторі, та не залежать від швидкості тіла. Приклади консервативних сил: сила тяжіння,

електростатичні сили, пружні сили. Сили тертя не є консервативними.

Вирази для потенціальної енергії різної взаємодії знаходять, розраховуючи роботу сил цієї взаємодії. Наприклад, знайдемо вираз для потенціальної енергії сили тяжіння.

Нехай тіло масою m підняли з землі на висоту h . Розрахуємо, яку роботу треба виконати проти сили тяжіння по переміщенню матеріальної точки на висоту h .

$$\Delta U = -A = -\int \delta A = -\int F dr ;$$
$$\Delta U = -\int_0^h (-mg) dr = (mg \times h - mg \times 0) = mgh$$

Приріст енергії склав mgh . Вираз

$$U_g = mgh$$

називаємо **потенціальною енергією тіла у полі сили тяжіння**.

Зазначимо, що потенціальна енергія тіла визначається відносно певного рівня. Так, потенціальна енергія людини, що стоїть на балконі другого поверху дорівнює нулю відносно підлоги балкону; вона є додатною відносно нульового рівня, вибраного на першому поверсі. Відносно ж нульового рівня, вибраного на балконі третього поверху, потенціальна енергія людини у нашому прикладі є від'ємною.

Розраховуючи роботу, яку треба виконати по переміщенню тіла проти певної консервативної сили, можна отримати вирази для потенціальної енергії пружної деформації, чи всесвітнього тяжіння.

Суму потенціальної і кінетичної енергій тіла чи системи тіл називають **механічною енергією**. Система, в якій діють лише консервативні сили, називається **консервативною**.

Закон збереження механічної енергії стверджує, що механічна енергія консервативної системи тіл залишається постійною в процесі руху системи.

Лекція 3: Молекулярна фізика та термодинаміка

Молекулярна фізика – розділ фізики, що вивчає, як властивості речовини на макроскопічному (доступному простим спостереженням) рівні пов'язані з властивостями її організації на рівні атомів та молекул.

Ідею про те, що речовина складається з окремих неподільних елементів, висловлювали ще давні греки (її приписують Демокриту). Пізніше ця ідея була забута, але все більша і більша кількість експериментальних даних нарешті змусила науковців повернутися до неї.

Згідно з сучасними уявленнями, будь-яка речовина складається з атомів та молекул, які перебувають в постійному і хаотичному русі. На підтвердження хаотичності руху можна привести приклади таких явищ, як броунівський рух (дрижання невеликих частинок, сажі чи пилку рослин, через штовхання з боку навколишніх молекул рідини) або дифузію в газах (поступове поширення одного газу крізь інший).

Розмір атома дуже малий і складає порядку 10^{-10} метра. Маса атомів також дуже мала – наприклад, маса атому карбону складає $1,99 \times 10^{-26}$ кг – тому вимірювати її в кілограмах незручно. Відносна атомна маса показує, у скільки разів маса даного атома є більшою за 1/12 маси ядра карбону-12.

Кількість атомів/молекул у звичних нам тілах вимірюється не десятками, і навіть не мільйонами. Її зручно обраховувати молями, де один **моль** містить $N_a = 6,02 \times 10^{23}$ штук, або **число Авогадро** штук атомів/молекул.

Корисною є ще одна фізична величина – **молярна маса**, або маса одного моля речовини.

$$\mu = m_0 N_a,$$

де m_0 – маса одної молекули у грамах . Одиниця вимірювання молярної маси – кг/моль.

Матерія може перебувати у різних фазових станах: газоподібному, рідкому чи твердому. Різниця між цими станами – у взаємному положенні частинок речовини та середній швидкості їх руху.

Так, атоми у газоподібному стані неупорядковані, вони вільно і хаотично рухаються, знаходяться далеко один від одного та займають весь доступний об'єм.

У рідкому стані речовина зберігає об'єм, але займає форму посудини. Частинки рідини притягуються одна до одної, але достатньо рухливі: вони можуть переміщуватись, перестрибуючи з одного положення рівноваги в інше.

У твердому стані речовина зберігає як форму, так і об'єм. Атоми в твердому тілі можуть лише коливатися навколо положень рівноваги.

Деякі властивості газів

Описувати гази ми будемо за допомогою таких величин:

- ✓ **Об'єм газу** V (м^3) – тобто місткість посудини, в якій газ знаходиться;
- ✓ **Тиск газу** p ($\text{Н/м}^2 = \text{Па}$, паскаль) – сила, з якою газ діє на одиницю площі поверхні; тиск виникає через зіткнення молекул зі стінками.

- ✓ **Температура** T ($^{\circ}\text{C}$, K) – ступінь нагрітості матерії, що проявляється наступним чином: тіла мають однакову температуру, якщо не обмінюються теплом. Одна з одиниць вимірювання температури – градус Цельсія. Якщо при атмосферному тиску 100 кПа приписати температурі тіла, що перебуває у рівновазі з сумішшю льоду і води, значення T_0 (0°C), а температурі тіла, що перебуває у рівновазі з водою, яка кипить, значення T_{100} (100°C), то

$$1^{\circ}\text{C} = \frac{T_{100} - T_0}{100}.$$

В молекулярній фізиці частіше використовують іншу одиницю температури – кельвін. Щоб перевести градус Цельсія в кельвіни, додайте до температури у градусах Цельсія $273,15$:

$$T_K = t_C + 273,15 \text{ K}$$

Сукупність інформації про кількість речовини у газі, його тиск, об'єм і температуру газу називається **станом** газу. Ми вивчаємо так званий рівноважний стан системи, тобто стан, у якому всі частини системи мають одну і ту ж температуру і тиск. Такий стан можна зобразити точкою на координатній площині (p, V) (p, T) (V, T) .

Взаємозв'язок величин, що описують газ, має велике практичне значення для розрахунку теплових двигунів, балістики, прогнозування погоди. Найпростіше експериментально вивчати взаємозв'язок двох величин, що визначають стан системи, при сталому значенні двох інших величин – так звані ізопроееси. Експериментальне вивчення поведінки газів привело до встановлення таких законів:

1. Закон Бойля-Маріотта

Для певної незмінної маси газу при сталій температурі добуток тиску на об'єм газу залишається сталим.

$$pV = \text{const}; \text{ або } p \sim \frac{1}{V}.$$

Процес, при якому температура газу залишається сталою, –

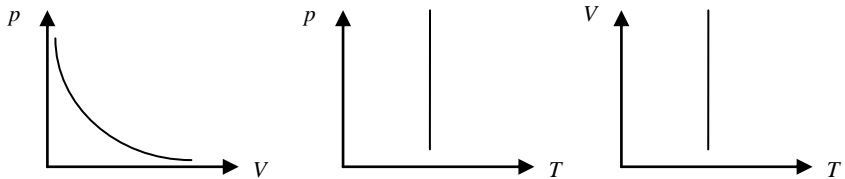


Рис. 3.1 Діаграми стану для ізотермічного

ізотермічний.

2. Закон Шарля

Для певної незмінної маси газу при сталому об'ємі відношення тиску газу до його температури залишається сталим.

$$\frac{p}{T} = \text{const}; \text{ або } p \sim T.$$

Процес, при якому об'єм газу залишається сталим, – ізохоричний.

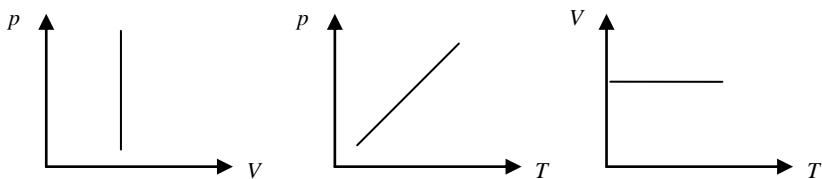


Рис. 3.2 Діаграми стану для ізохоричного процесу

3. Закон Гей-Люсака

Для певної незмінної маси газу при сталому тиску відношення об'єму газу до його температури залишається сталим.

$$\frac{V}{T} = \text{const}; \text{ або } V \sim T.$$

Процес, при якому тиск газу залишається сталим, – ізобаричний.

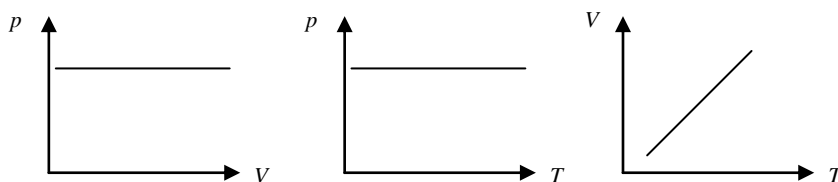


Рис. 3.3 Діаграми стану для ізобаричного процесу

4. Рівняння Менделєєва-Клапейрона

Усі три попередні рівняння можна зв'язати в одне рівняння, що визначає усі три параметри системи

$$pV = \frac{m}{\mu} RT \text{ або } pV = \nu RT$$

Тут $R = 8,31$ Дж/(К·моль) – універсальна газова стала, μ – молярна маса газу, m – маса газу, ν – кількість молів газу.

Рівняння Менделєєва-Клапейрона можна вивести математично, якщо припустити що: газ складається з матеріальних точок, взаємодія (зіткнення) цих точок абсолютно пружні, та між цими матеріальними не діють сили притягання чи відштовхування. Таку модель газу називають **ідеальним газом**.

Рівняння Менделєєва-Клапейрона дуже гарно описує поведінку газів за звичних нам температур та тисків. Густина газів за цих умов в

тисячі разів менша за густину рідин. Це означає, що відстань між молекулами газів в десятки разів більша за відстань між молекулами рідин. В таких умовах молекули газу майже не відчують присутності одна одної, і модель ідеального газу добре підходить для їх опису.

Натомість, поведінка газів за низьких температур і високого тиску відрізняється від поведінки, передбаченої рівнянням Менделєєва-Клапейрона. Одним з найвідоміших рівнянь, що описує поведінку реальних газів є рівняння Ван-дер-Ваальса. Нижче воно сформульоване для 1 моля газу

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

Тут $\frac{a}{V^2}$ – доданок, що характеризує внутрішній тиск у газі через сили притягання між молекулами; b – доданок, що характеризує власний об'єм молекул речовини. Значення констант a і b визначені для різних газів і є табличними величинами.

Властивості тіл, що можна виміряти безпосередньо (тиск, об'єм, температура), або їх макровластивості, можна пояснити через рух окремих молекул, або їх мікровластивості (швидкість руху молекул, здійснення ними коливань чи обертання).

Можна показати, що тиск і швидкість молекул зв'язані таким чином:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v^2 \rangle,$$

тут n – концентрація молекул газу, тобто кількість молекул газу в одиниці об'єму, m_0 – маса атомів газу, $\langle v^2 \rangle$ – середнє значення квадратів швидкостей молекул у газі. Даний вираз носить назву **основного рівняння кінетичної теорії газів**.

Як зв'язана швидкість молекул газу з температурою? Порівняємо основне рівняння кінетичної теорії газів з рівнянням Менделєєва-Клапейрона, записаного для 1 моля речовини

$$\begin{cases} pV = RT \\ pV = \frac{2}{3} N_a E_k \end{cases} \Rightarrow E_k = \frac{3}{2} \frac{R}{N_a} T \text{ або } E_k = \frac{3}{2} kT,$$

де $k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К – константа Больцмана.

Вираз

$$E_k = \frac{3}{2} kT$$

показує, що температура є мірою середньої кінетичної енергії атомів у газі.

Швидкість молекул газу дуже сильно відрізняється – якісь з них рухаються дуже повільно, інші – дуже швидко. Але яка саме частка молекул газу рухається з великими швидкостями? Яка частка – з малими? Експериментально розподіл молекул за швидкостями було знайдено в дослідах Штерна (рис. 3.4). Вузький промінь, сформований швидкими атомами срібла, що випаровувалися з розжареної дротини, падав на екран. Цей екран, в свою чергу, обертався у вакуумованому середовищі. Атоми осідали на екрані, формуючи шар певної товщини. Атоми з різними швидкостями осідали в різних частинах екрану. Товщина сформованої плівки виявилась неоднаковою. По краях (там, де осідали найшвидші, та найповільніші атоми) вона була тонкою, ближче до середини її товщина збільшувалась.

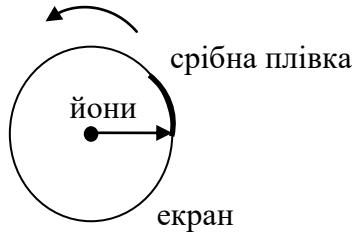


Рис. 3.4 До досліду Штерна

У такий спосіб було встановлено, що атоми мають різні швидкості: є невелика частка атомів, що рухаються дуже швидко, також є невелика частка атомів, що рухаються дуже повільно. Решта частинок рухаються з якимись проміжними значеннями швидкостей.

Те, яка частка (відсоток) атомів газу має швидкості в певному інтервалі швидкостей (від v до $v + dv$), називають розподілом газу по швидкостях. Англійський вчений Джеймс Максвел зміг показати, якою функцією описується цей розподіл. Вираз для форми розподілу отримав назву **розподілу Максвела**

$$\frac{dN}{N} = 4\pi \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}} dv$$

Тут $\frac{dN}{N}$ – частка атомів, що має швидкості в інтервалі швидкостей від v до $v + dv$, T – температура газу, m_0 – маса атомів газу, k – константа Больцмана, e основа натурального логарифма, $e \approx 2,72$.

Графіки розподілу Максвела при різних температурах показані на рис. 3.5. Найбільше у газі молекул зі швидкістю

$$v_{im} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}},$$

де T – температура газу, R – універсальна газова стала, μ – молярна маса атомів (чи молекул) газу.

Середньоквадратична швидкість частинок газу – корінь з середнього значення квадрату швидкості частинок – визначається як

$$v_{\text{скв}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}.$$

Значення $v_{\text{зм}}$ і $v_{\text{скв}}$ не співпадають, оскільки функція розподілу

Максвела не симетрична відносно свого максимального значення.

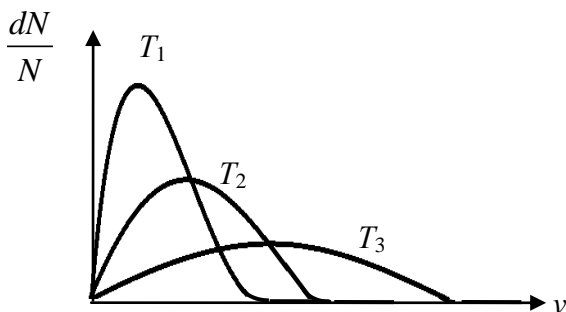


Рис. 3.5 Розподіл Максвела для газів різних температур,
 $T_3 > T_2 > T_1$

У рівноважному стані газу хаотичний тепловий рух його молекул призводить до того, що газ рівномірно розподіляється по всьому об'єму посудини в яку він вміщений; тобто в кожній одиниці об'єму посудини в середньому міститься однакове число молекул. Однак якщо газ знаходиться під дією зовнішніх сил, то розподіл його молекул по заповненому об'єму може бути і неоднорідним. Так, у атмосфері Землі на всі частинки, з яких складається повітря, діє сила тяжіння. Чи буде концентрація молекул повітря, що розташована на різних висотах, однаковою?

Згідно з **розподілом Больцмана**, в силовому полі кількість частинок в одиниці об'єму (концентрація частинок) n , що мають потенціальну енергію U , порівняно з кількістю частинок в одиниці об'єму в області, чия потенціальна енергія дорівнює нулю, n_0 пов'язані як

$$n = n_0 e^{-\frac{U}{kT}}.$$

Тут k – константа Больцмана, T – температура (рис 3.6(a)).

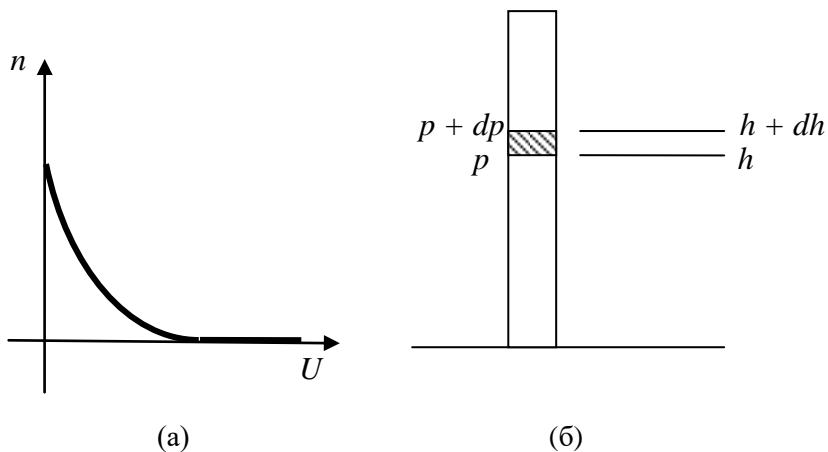


Рис. 3.6 (а) Розподіл Больцмана, (б) до виведення барометричної формули

Концентрація частинок впливає на тиск, що спричинюється ними на стінки посудини. Як змінюється атмосферний тиск з висотою (рис 3.6(б))? Згадаємо, що тиск – це сила, що діє на одиницю площі стінки посудини з боку газу.

Запишемо вираз для тиску повітря на висоті h над поверхнею Землі. Сила, з якою молекули повітря діють на поверхню Землі, – сила тяжіння, mg . З цих міркувань можна отримати вираз для тиску стовпа повітря густиною ρ і висотою h : $p = \rho gh$.

Різниця тисків між поверхнями шару повітря нескінченно малої товщини пропорційна до товщини цього шару dh

$$dp = -\rho g dh.$$

За означенням, густина тіла $\rho = \frac{m}{V}$, отже,

$$dp = -\frac{m}{V} g dh.$$

З рівняння Менделєєва-Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{\mu} RT \quad \text{або} \quad \frac{m}{V} = \frac{p\mu}{RT}.$$

Підставляючи, отримуємо диференціальне рівняння:

$$dp = -\frac{p\mu g}{RT} dh.$$

Розділяємо змінні

$$\frac{dp}{p} = -\frac{\mu g}{RT} dh.$$

Інтегруємо за всіма можливими висотами

$$\int_{p_0}^p \frac{dp}{p} = -\int_0^h \frac{\mu g}{RT} dh,$$

$$\ln p - \ln p_0 = -\frac{\mu g}{RT} h,$$

Спрощуючи цей вираз, отримуємо:

$$p = p_0 e^{-\frac{\mu g h}{RT}},$$

$$p = p_0 e^{-\frac{m_0 g h}{kT}},$$

де m_0 маса молекул, з яких складається газ.

Цей вираз має назву **барометричної формули** і дає можливість розрахувати тиск газу на будь-якій висоті. З барометричної формули випливає, що атмосферний тиск спадає з висотою.

Деякі властивості рідин

Між молекулами рідин діють сили притягання. Міжмолекулярні сили є короткодійними і одна молекула “відчуває” іншу на відстані не більше декількох розмірів молекул. З цим пов’язані явища поверхневого натягу і капілярний ефект. Ці ж сили діють і на молекули речовин, що дотикаються до рідини (молекули речовини посудини). Прояви сил поверхневого натягу відомі усім: краплі води намагаються прийняти сферичну форму; мокре волосся, яким би пухким воно не було в сухому стані, злипається, коли стає мокрим.

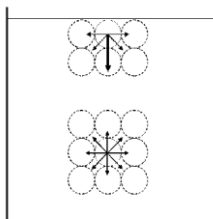


Рис. 3.7 До пояснення механізму виникнення сили поверхневого натягу

Пояснимо явище поверхневого натягу: молекула у товщі рідини симетрично оточена іншими молекулами з усіх боків. Рівнодійна сил, з якими кожна з них діє на обрану молекулу, дорівнює нулю. Інша ситуація спостерігається для молекули рідини з приповерхневого шару. Ця молекула не має сусідів з одного боку і симетрія порушується. Рівнодійна сил, з якими її оточення діє на дану молекулу, не дорівнює нулю і направлена вниз. Отже, молекули, що розташовані на поверхні, відчувають силу, що втягує їх вглиб рідини. В результаті рідина намагається зменшити кількість

молекул, що знаходяться на поверхні, таким чином зменшуючи площу своєї поверхні (рис. 3.7).

В результаті дії сил поверхневого натягу тиски під плоскою поверхнею і вигнутою поверхнею рідини – різні. Зменшення тиску під викривленою поверхнею призводить, зокрема, до появи так званих капілярних явищ – піднімання рівня рідини в тонких трубках. Утворення випуклих форм на поверхні Землі при замерзанні рідини, що піднімається ґрунтом як капіляром, носить назву **морозного пучення**. Гідролаколіти, або пінго, – це маси ґрунтового льоду, що утворюються в зоні багаторічної мерзлоти і досягають висоти 80 метрів.

Елементи термодинаміки

В природі та в техніці тіла мають різну температуру і можуть обмінюватись енергією не лише шляхом виконання механічної роботи, але й шляхом теплообміну. Зворотній процес виконання роботи за рахунок тепла також можливий. Науковців цікавить питання: як системи, що складаються з атомів, можуть обмінюватись енергією? Як вони поглинають її, як віддають? Узагальнена поведінка таких систем описується законами термодинаміки.

Щоби сформулювати закони термодинаміки необхідно ввести певні поняття.

- ✓ **Теплотою** будемо називати енергію, яка спонтанно перетікає між тілами різної температури без виконання механічної роботи та обміну речовиною.

Поняття теплоти легше зрозуміти, познайомившись з поняттям теплоємності. **Теплоємність** – це кількість теплоти, яку треба надати тілу, щоби збільшити його температуру на одиницю.

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

Для різних ізопроцесів теплоємність газу може бути різною. Це залежить від того, чи змінюються кінетичні енергії частинок газу, та чи розширюється при цьому газ. Інакше кажучи, перебіг термодинамічних процесів визначають ще дві величини: внутрішня енергія газу і робота, яку він виконує.

- ✓ **Внутрішня енергія** – це сума кінетичних і потенціальних енергій частинок системи. Якщо нехтувати силами взаємодії між атомами, а також наявністю енергії, що зберігається у міжатомних зв'язках молекул, один моль одноатомних газів містить таку кількість внутрішньої енергії

$$U = \frac{3}{2} RT ,$$

де R – універсальна газова стала, T – температура у кельвінах. Внутрішня енергія одного молю двох- і багато- атомних молекул більша, бо такі молекули можуть мати енергію, пов'язану з їхнім обертанням і коливаннями.

- ✓ **Робота**, що виконується системою при зміні її об'єму

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV .$$

В залежності від того, чи змінюється тиск p під час процесу і як саме при цьому тиск залежить від об'єму, вираз для роботи може бути різним.

Сформулюємо і дослідимо три закони (начала) термодинаміки.

Перший закон термодинаміки описує, в яких випадках може змінюватися внутрішня енергія системи: зміна внутрішньої енергії

відбувається за рахунок надання системі теплоти та здійснення роботи над нею. Еквівалентне формулювання: «теплота, надана системі, йде на збільшення її внутрішньої енергії і здійснення нею роботи над іншими тілами». Якщо позначити теплоту, надану системі, літерою Q , цей закон можна записати математично як

$$Q = \Delta U + A.$$

Другий закон термодинаміки описує оборотні циклічні процеси.

Оборотний процес – такий процес, що можна провести в оберненому напрямку. Наприклад, газ в закритій посудині можна нагріти на 10 градусів, а потім на стільки ж охолодити. Це оборотний процес. Однак не можна випустити газ з посудини навколишній простір, а потім зібрати його ж назад. Такий процес – необоротний.

Циклічний процес – це процес, після закінчення якого система повертається в початковий стан.

Тепловий двигун – машина з перетворення тепла в механічну роботу (рис. 3.8).

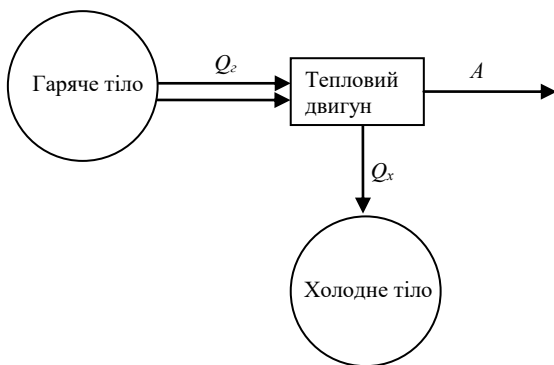


Рис. 3.8 Тепловий двигун

Ефективність переведення машиною тепла в роботу визначається **коефіцієнтом корисної дії** теплової машини; він показує, яка частка теплоти, наданої тепловій машині (Q_z), була перетворена на корисну роботу (A)

$$\eta = \frac{A}{Q_z} \times 100\% .$$

ККД реальних теплових двигунів є значно меншим за 100%. Наприклад, ефективність дизельних двигунів складає від 35% до 40%. Експериментально відомо, що жодний тепловий двигун не має ефективності у 100%, а також, що завжди існує втрата енергії в навколишнє середовище.

Ці експериментальні факти допомогли сформуванати **другий закон термодинаміки**: неможливо побудувати теплову машину, що працює циклічно, єдиним результатом якої було б перетворення тепла в роботу.

Для формулювання **третього закону термодинаміки** необхідно ввести поняття ентропії. Ентропія системи – міра безладу, хаосу в системі.

Ентропія системи визначається за формулою Больцмана: $S = k \ln \Omega$ де Ω – число мікроскопічних станів, які реалізують даний макроскопічний стан. Цю величину можна розуміти, наприклад, як кількість можливих варіантів станів атомів, які б призводили до однієї і тієї ж температури, об'єму і тиску газу.

За третім законом термодинаміки, при абсолютному нулі температур ентропія системи прямує до нуля. Наслідок третього начала термодинаміки: абсолютний нуль температур недосяжний.

Для того, щоб забрати усю кінетичну енергію у атомів, поставити їх у положення «струнко», необхідно було б витратити нескінченно велику кількість енергії. Всесвіт опирається порядку. Наразі найменша температура, яку досягнуто в лабораторії, 100 пікокельвінів, тобто 10^{-10} К. Європейське космічне агентство пропонує повторити досліди у відкритому космосі, аби досягти температури порядку фемптокельвінів, тобто 10^{-15} К.

Лекція 4: Електрика

Електрика – розділ фізики, що вивчає взаємодію між зарядженими тілами та закони проходження електричного струму.

Електростатика

Було помічено, що у деяких тіл є властивість, яку ми називаємо електричним **зарядом**. Тіла, що володіють зарядами, можуть притягуватись або відштовхуватись. Зарядів буває два типи; ми називаємо їх додатними і від'ємними зарядами. Однойменні заряди відштовхуються, а різнойменні – притягуються. Надати тілу заряд можна, наприклад, потерши одне тіло об інше. Якщо ви натрете шматок скла шовковою хустинкою, скло отримає додатний заряд, а шовк – від'ємний.

Поверхня Землі несе слабкий від'ємний, а атмосфера Землі – слабкий додатний заряди. В цілому планета Земля містить однакову кількість додатних і від'ємних зарядів, тобто вона електрично нейтральна.

Одиниця вимірювання заряду – кулон (Кл). Заряд може бути переданий лише дискретно, тобто порціями. Найменша порція заряду – заряд одного електрона, що дорівнює $e = 1,6 \times 10^{-19}$ Кл.

Заряджені об'єкти можуть взаємодіяти на відстані. Ми будемо називати заряджені тіла, розмірами яких можна знехтувати у порівнянні з відстанню між цими тілами, **точковими зарядами**.

Сила взаємодії між двома нерухомими точковими зарядами, що знаходяться у вакуумі, прямо пропорційна добутку зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані між ними. Це

експериментально підтверджене твердження носить назву **закону Кулона**

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

або у векторній формі

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}.$$

Константа ϵ_0 – електрична стала (діелектрична проникність вакууму), $\epsilon_0 = 8,9 \times 10^{-12}$ Ф/м, q_1, q_2 – заряди, r – відстань між зарядами.

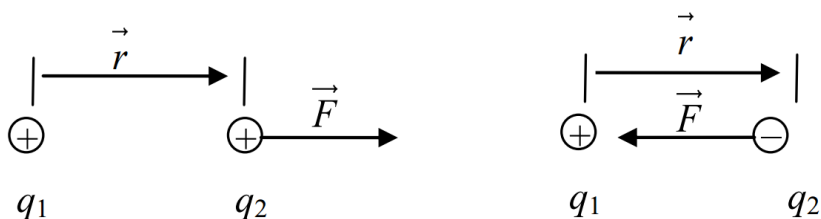


Рис. 4.1 Сила Кулона, що діє на заряд q_2 з боку заряду q_1 .

Заряди пливають на інші заряджені тіла, що розташовані навколо них. Інакше кажучи, вони створюють навколо себе електричне поле. Щоб показати, наскільки «сильне» електричне поле здатний утворити певний заряд q , використовують величину, що має назву **напруженості електричного поля**. За означенням, напруженість електричного поля – це сила, що діє в даній точці простору на одиничний додатній точковий заряд.

Вираз для напруженості електричного поля точкового заряду

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2},$$

або у векторній формі

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}.$$

Одиниці вимірювання напруженості електричного поля – Н/Кл.

Електричне поле можна візуалізувати за допомогою ліній напруженості електричного поля. Дотичні до ліній напруженості показують, у якому напрямку діють сили на додатний заряд, вміщений в це поле. Лінії напруженості починаються на додатному заряді та закінчуються на від'ємному. Чим щільніше розташовані лінії напруженості в певній області, тим більшою в ній є напруженість електричного поля.

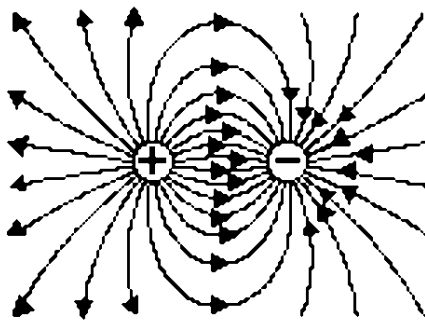


Рис. 4.2 Лінії напруженості електричного поля пари протилежно заряджених тіл.

Для електричних полів виконується принцип суперпозиції: якщо у певній точці простору діють поля \vec{E}_1 і \vec{E}_2 , то загальне поле у цій точці

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

Таким чином, щоб знайти у довільній точці величину поля неточкового протяжного джерела, можна в уяві розбити його на точкові заряди та скласти всі поля, що створює кожен з цих точкових зарядів інтегруванням.

Взяття інтегралів може бути складною справою, і тоді на допомогу приходить теорема Гауса.

Введемо таке поняття як **потік вектора напруженості електричного поля** через поверхню. В найпростішому випадку, коли лінії напруженості перпендикулярні до обраної поверхні, потік вектора напруженості електричного поля E_n через поверхню площею S визначається як

$$\Phi_E = \int_S E_n dS.$$

Поверхня S може мати будь-яку форму. В тому числі, поверхня може бути замкненою. Потік через замкнену поверхню математично представляється як

$$\Phi_E = \oint E_n dS$$

Згідно з **теоремою Гауса**, потік вектора напруженості електричного поля через замкнену поверхню прямо пропорційний до заряду, що міститься всередині цієї поверхні

$$\oint E_n dS = \sum \frac{q_i}{\epsilon_0}.$$

При розв'язанні задач обирають таку форму поверхні, щоб напруженість поля була однакою в усіх точках цієї поверхні, а лінії напруженості поля – перпендикулярні до неї. Тоді інтеграл $\oint E_n dS$ перетворюється просто на добуток ES .

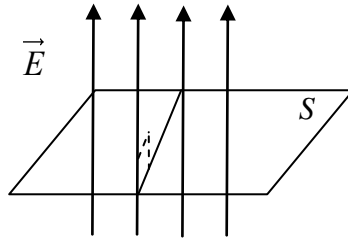


Рис. 4.3 Потік вектора \vec{E} через поверхню S

Наведемо приклад: чому дорівнює напруженість електричного поля на відстані r від довгого дроту довжиною l , лінійна густина заряду на якому $\lambda = \frac{q}{l}$?

Очевидно, що з симетрійних властивостей, поверхня, для якої напруженість поля однакова, – циліндр. Площа бічної поверхні циліндра дорівнює

$$S = 2\pi r l ,$$

тоді потік вектора \vec{E} через таку поверхню складає

$$\oint E_n dS = E 2\pi r l$$

За теоремою Гауса,

$$E 2\pi r l = \sum \frac{q_i}{\epsilon_0} = \frac{\lambda l}{\epsilon_0} ,$$

звідси вираз для напруженості електричного поля довгого провідника наступний

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{r} .$$

Аналогічним чином можна вивести вирази для напруженості електричного поля заряджених об'єктів інших простих форм – сфери, кулі, т.і.

Сила Кулона – консервативна сила. Вираз

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r}$$

можемо назвати **потенціальною енергією електричного поля**. Потенціальна енергія електричного поля для точкових зарядів, що нескінченно віддалені один від одного, – нуль.

Для того, щоб охарактеризувати кількість потенціальної енергії, що нею володіє одиничний додатній заряд у полі певного заряду q на відстані r від нього, використовують фізичну величину, яка носить назву **потенціалу** електричного поля. Для точкового заряду q потенціал електричного поля на відстані r від цього заряду записується як

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}.$$

Для зображення поля іноді використовують **еквіпотенціальні поверхні**, тобто такі області, в яких потенціал поля однаковий. В будь-якій точці еквіпотенціальні поверхні перпендикулярні до ліній напруженості поля (див. рис. 4.4).

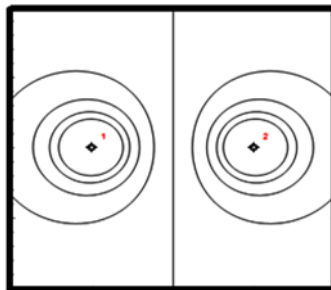


Рис. 4.4 Еквіпотенціальні поверхні системи двох протилежно заряджених точкових зарядів

Напруженість поля – векторна величина, а потенціал – скалярна, однак між ними існує зв'язок:

$$\vec{E} = -\frac{d\varphi}{dr} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}.$$

Наведені до цього часу формули працюють для опису взаємодії між зарядженими тілами у вакуумі. Як же буде поводитись поле у речовині? Це буде залежати від того, до якого класу речовин вона відноситься: до провідників чи діелектриків.

Діелектрики – це речовини, від'ємні заряди яких (електрони) прив'язані до відповідних атомів чи молекул. Внаслідок взаємодії з зовнішнім електричним полем молекули можуть поляризуватися, тобто заряд у них може перерозподілятися так, щоб створити електричне поле, протилежне за напрямком до зовнішнього поля. Інші молекули можуть розвертатися так, щоб компенсувати зовнішнє поле. В результаті всередині діелектрика зовнішнє електричне поле послаблюється в ϵ разів, де ϵ – константа, **діелектрична проникність речовини**. Тоді, якщо два точкових заряди взаємодіють в такій речовині, сила між ними в ϵ разів менше, ніж аналогічна сила у вакуумі.

$$F' = \frac{F_{\text{вакуум}}}{\epsilon} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q_1q_2}{r^2}.$$

Провідники – це речовини, заряджені частинки яких можуть рухатися. Наприклад, деякі заряди можуть бути не зв'язані з відповідними атомами. Якщо провідник внести в зовнішнє електричне поле, вільні заряди розподіляються таким чином, щоб повністю компенсувати зовнішнє електричне поле всередині провідника.

Електричний струм

Впорядкований рух зарядів називають **електричним струмом**. За напрямком струму вибирається напрямок руху додатних зарядів. Струм тече від точки з більшим потенціалом до точки з меншим потенціалом. Якщо за час t провідником протікає заряд q , кажуть, що **сила струму** в цьому провіднику дорівнює

$$I = \frac{q}{t}.$$

Сила струму вимірюється в амперах $A = Кл/с$.

Іноді зручно використовувати не силу струму, а **густину струму** – тобто силу струму на одиницю площі перерізу провідника

$$\vec{j} = \frac{I}{S} \vec{n},$$

тут \vec{n} – одиничний вектор у напрямку руху зарядів, що утворюють струм. Величина \vec{j} пропорційна дрейфовій (впорядкованій) швидкості руху вільних зарядів у провіднику \vec{v} , заряду кожного з них e , та концентрації носіїв заряду n :

$$\vec{j} = nq\vec{v}$$

Як змусити заряди рухатися через провідник швидше? Для цього треба створити на його кінцях більшу різницю потенціалів. Різницю потенціалів часто називають **напругою**, V ; її одиниця вимірювання – вольт. Тож,

$$I \sim V.$$

Коефіцієнт пропорційності, що зв'язує ці дві величини, **опір**, R , вимірюється в омах. Опір – величина, яка показує, наскільки певний зразок опирається протіканню крізь нього струму. Опір певного провідника можна визначити за наступною формулою

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

де ρ – питомий опір, характеристика речовини при певній температурі, l – довжина провідника, S – площа його перерізу. Опір провідників зростає з температурою, оскільки тепловий рух носіїв заряду заважає їх направленому руху.

Вираз

$$I = \frac{V}{R}$$

носить назву **закону Ома для ділянки кола**.

Для того, щоб сформулювати закон Ома для повного кола, необхідно ввести нові означення. Підтримувати струм неможливо без джерела енергії – батареї. Носії заряду, через відштовхування однойменних зарядів, течуть від її одного полюсу до іншого. Однак для того, щоб змусити їх знову пройти через батарею, треба виконати над ними роботу проти електричного поля. Така робота з переміщення додатного одиничного заряду крізь батарею називається **електрорушійною силою** Е.Р.С., позначається літерою ε .

Різниця потенціалів V , яку можна досягнути між полюсами батареї з Е.Р.С. ε , дорівнює

$$V = \varepsilon - Ir ,$$

де r – внутрішній опір провідника. Вираз

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

носить назву **закону Ома для повного кола**.

Різноманітні елементи, підключені до електричного кола, в змозі перетворювати хімічну енергію, що зберігається у батареї, в теплову чи механічну енергію. Ці елементи можна підключати у різних комбінаціях: послідовно чи паралельно.

Для розрахунку падінь напруги і струмів крізь різні елементи електричних кіл використовують так звані **правила Кірхгофа**.

Перше правило: У будь-якому вузлі сума струмів дорівнює нулю. Математично:

$$\sum I_i = 0.$$

Друге правило: Для будь-якого замкненого кола Е.Р.С. дорівнює сумі падінь напруги на цьому контурі. Якщо напрямок обходу контуру проходить через джерело Е.Р.С. від додатного полюса до від'ємного, таке джерело Е.Р.С. ε_i береться з додатним знаком (у протилежному випадку – від'ємним). Падіння напруги вважається додатним, якщо напрямок обходу контуру співпадає з напрямком протікання струму через елемент контуру (у протилежному випадку – від'ємним). Математично:

$$\sum \varepsilon_i = \sum I_j R_j.$$

Електричні методи у георозвідці

Електричні методи знаходять своє застосування у георозвідці. Наша Земля – провідник. Різні її породи мають різний питомий опір. Питомі опори різних порід відомі та можуть бути використані, зокрема, для їх ідентифікації в процесі георозвідки. Так, питомий опір граніту складає від 10^2 до 10^4 Ом·м, а глини – від 8 до 70 Ом·м.

Технологія *mise-a-la-massé* використовується в гірничодобувній промисловості з 1920-х років для визначення наявності електропровідних порід у надрах. Електрод, по якому тече струм, поміщається в провідне тіло (або встромляється в поверхню Землі, або опускається у свердловину) там, де необхідно провести дослідження; другий електрод зі струмом (що замикає електричне коло) встромляється у землю на достатньо великій відстані. Таким чином на всій досліджуваній поверхні створюється електричне поле.

Еквіпотенціальні лінії цього поля можуть бути візуалізовані за допомогою вольтметра – приладу, що вимірює різницю потенціалів між двома точками – та двох мобільних зондів. Форма цих еквіпотенціальних ліній, як правило, повторює форму провідного тіла, що розташоване під поверхнею Землі. Такий метод можна застосовувати, зокрема, для складення карт провідних (іонних) виток свердловини, затоплених гірських виробок, та мінералізованих зон розлому.

Лекція 5: Магнітні явища та електромагнетизм

Термін «магнетизм» вживають для опису сукупності явищ і властивостей, пов'язаних з існуванням магнітного поля. Якісно існування магнітного поля і певних магнітних властивостей можна спостерігати у таких дослідах: магніти можуть притягуватися та відштовхуватися залежно від того, якими своїми полюсам вони обернені; сили, з якими магніти притягують один одного, спадають з відстанню; магніти змінюють орієнтацію стрілки компасу, піднесеного до них.

Природа магнітної взаємодії

Але яка ж природа магнітної взаємодії? Підказкою є те, що аналогічну до перерахованих дій може спричиняти провідник, по якому тече струм. Тобто електричний струм створює навколо себе магнітне поле.

Найпростіший спосіб переконатися у цьому – відтворити дослід Ерстеда. Для цього треба зібрати просту електричну схему, що складається з довгого прямого дроту, джерела струму та вимикача. Довгий прямий дріт необхідно розмістити у напрямку північ-південь. Коли коло роз'єднано, то стрілка компасу, піднесеного до дроту, буде паралельна цьому дроту. Якщо тепер замкнути електричний контур і розмістити компас безпосередньо над дротом, його стрілка розвернеться в бік перпендикулярний до дроту (а). Якщо перемістити компас під дріт, стрілка розвернеться в протилежний бік, але також намагатиметься встати перпендикулярно до дроту (дивись рис. 5.1).

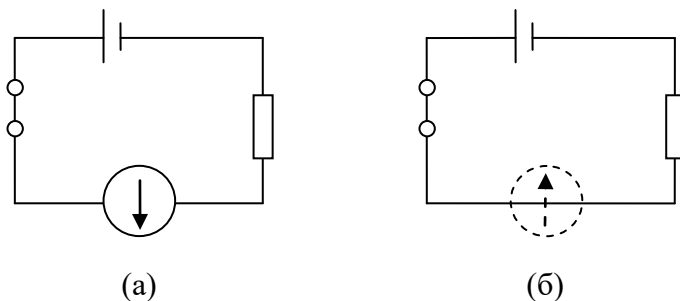


Рис. 5.1 Дослід Ерстеда: струм змінює орієнтацію стрілки компасу

За напрямок магнітного поля ми можемо вважати той напрямок, який приймає стрілка компасу, вміщена в це поле. А як формально визначити величину цього поля?

Для його характеристики будемо використовувати фізичну величину, що носить назву **вектора магнітної індукції**, \vec{B} . Напрямок вектору магнітної індукції співпадає з напрямком, який приймає стрілка компасу, внесеної у це поле. Величина індукції магнітного поля визначається силою, що діє на рухомий заряд, вміщений в це поле.

Якщо заряд q рухається зі швидкістю v перпендикулярно до напрямку магнітного поля, на нього діє сила F , так що

$$|\vec{B}| = \frac{F}{qv}.$$

Одиниця вимірювання магнітної індукції – тесла (Тл). Як видно з наведеної вище формули, $\text{Тл} = \frac{\text{Н}\cdot\text{с}}{\text{Кл}\cdot\text{м}}$. В геофізичних дослідженнях часто використовують позасистемну одиницю гаус (Гс): $1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Тл}$.

Магнітна індукція магнітів, що застосовуються в побуті, складає порядку 0,1 Тл, величина магнітного поля Землі – 10^{-4} Тл, найпотужніше магнітне поле, створене в лабораторних умовах, 45 Тл.

Візуалізувати напрямок магнітного поля можливо за допомогою **ліній магнітної індукції** – кривих, дотична до яких показує напрямок вектору магнітної індукції в кожній точці простору.

Сила Лоренца

Сила, що діє на заряд q , який рухається у магнітному полі \vec{B} зі швидкістю \vec{v} , носить назву **сили Лоренца**

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

Модуль сили Лоренца дорівнює

$$F = qvB\sin\alpha,$$

де α – кут між векторами \vec{v} та \vec{B} . Її напрямок можна визначити за допомогою правила правої руки, описаного в попередніх розділах.

Напрямок сили Лоренца обов'язково перпендикулярний до напрямку вектора швидкості частинки, що рухається. В результаті такої взаємодії з полем частинку «загортає» за коловою траєкторією (рис. 5.2). Радіус цієї траєкторії визначається зарядом частинки, її швидкістю, а також масою.

Останній факт дозволяє використовувати даний ефект для побудови приладу, що носить назву мас-спектрометра. Якщо йони різних атомів відхиляються за траєкторіями різних радіусів, то за тим, де саме опиниться заряджена частинка, що влетіла в магнітне поле, можна визначити її масу, а значить і хімічну ідентичність. Мас-спектрометрія широко застосовується для аналізу складу органічних

сполук у ґрунтах, встановлення рівнів забруднень вод та визначення складу нафт і їхніх фракцій.

Яким чином можна створити магнітне поле необхідної величини і напрямку?

Експериментально встановлено, яке саме поле утворює мала ділянка провідника довжиною dl , по якому тече електричний струм i , на відстані r від цього провідника (дивись рис. 5.3). Цей експериментальний факт відомий як **закон Біо-Савара-Лапласа**.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i [d\vec{l} \times \vec{r}]}{r^3}.$$

Тут μ_0 – магнітна стала, яка в СІ дорівнює $4\pi \times 10^{-7}$ Т.м/А.

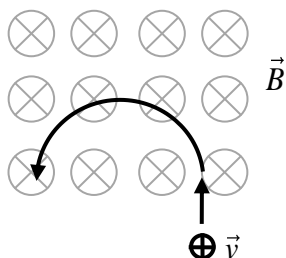


Рис. 5.2 Траєкторія руху заряду в магнітному полі

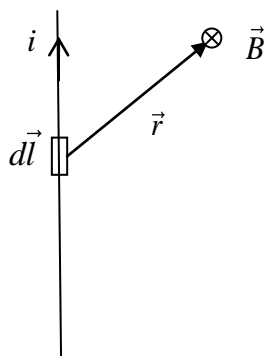


Рис. 5.3 До закону Біо-Савара-Лапласа

Магнітне поле струмів

Закон Біо-Савара-Лапласа можна використовувати для визначення магнітного поля провідників зі струмом різної форми (наприклад,

нескінченно довгого провідника, колової рамки зі струмом, соленоїда), підсумувавши магнітні поля, які утворюють кожна з ділянок провідника, за допомогою інтегрування

$$\vec{B} = \int_{l_1}^{l_2} \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i [\vec{dl} \times \vec{r}]}{r^3}.$$

Якщо інтегрування викликає певні труднощі, для знаходження магнітної індукції поля протяжного об'єкта можна застосувати **закон Ампера для циркуляції магнітного поля**. Він стверджує, що інтеграл по замкненому контуру від магнітної індукції \vec{B} пропорційний силі електричного струму i , що протікає через площу, обмежену цим замкненим контуром. Математично, його прийнято записувати у наступному вигляді.

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 i.$$

Використання цього закону дозволяє суттєво спростити задачу про знаходження магнітного поля симетричного об'єкта. Якщо з міркувань симетрії вибрати замкнений контур такої форми, що величина індукції магнітного поля в кожній його точці однакова, тоді інтеграл перетворюється на добуток величини індукції поля та довжини цього контуру.

Отримаємо вираз для індукції магнітного поля на відстані x від довгого провідника, що несе струм i . З симетрійних міркувань очевидно, що його магнітне поле однакове на цій відстані з усіх боків провідника. Виберемо замкнутий контур у формі кола.

Довжина цього контуру дорівнює $2\pi x$, і тому $\oint \vec{B} d\vec{l} = B \times 2\pi x$.

Застосовуючи закон Ампера для циркуляції магнітного поля, отримуємо кінцевий вираз

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi x}.$$

Змінне електричне поле також є джерелом, що породжує магнітне поле. З його врахуванням можна узагальнити закон Ампера для циркуляції магнітного поля. В цьому випадку його називають **законом Ампера-Максвела**:

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \left(i + \frac{d\Phi_E}{dt} \right),$$

тут Φ_E потік вектору напруженості електричного поля, введений нами раніше.

Магнітне поле у речовині

Досі ми розглядали магнітні поля, утворені струмами. Чому ж деякі речовини також можуть демонструвати магнітні властивості? В принципі, будь-яка речовина здатна під дією зовнішнього магнітного поля ставати джерелом власного магнітного поля (намагнічуватися). Намагнічена речовина створює магнітне поле \vec{B}' , яке накладається на обумовлене струмами поле \vec{B}_0 , так що результуюче поле є їхньою сумою, $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$.

Для пояснення намагнічування тіл Ампер припустив, що в молекулах речовини циркулюють колові струми. Кожний такий струм створює у навколишньому просторі власне магнітне поле. За відсутності зовнішнього поля молекулярні струми орієнтовані неупорядковано, внаслідок чого результуюче магнітне поле дорівнює нулю. Під дією зовнішнього поля молекулярні струми можуть набувати переважну орієнтацію в певному напрямку, внаслідок чого матеріал намагнічується, тобто створює власне магнітне поле.

Постійні магніти виготовлені з матеріалів, які намагнічуються і створюють своє власне стійке магнітне поле. До того, як вчені зрозуміли взаємозв'язок магнітних явищ з рухом зарядів, взаємодію постійних магнітів і стрілок компаса описували в термінах **магнітних полюсів**. Якщо постійний магніт може вільно обертатися, один з його кінців розвертається у північному напрямку. Цей кінець магніту називається його північним полюсом або N полюсом; інший кінець – південним полюсом або S полюсом. Протилежні полюси притягуються, а однойменні полюси відштовхуються.

Явище електромагнітної індукції

Як було вказано вище, струм чи змінне електричне поле можуть породжувати магнітне поле. А чи можливий обернений процес: чи може магнітне поле генерувати струм?

Поклавши магніт біля провідної рамки з чутливим амперметром, ви не побачите жодної реакції вимірювального пристрою. Але варто різко відсунути магніт від рамки, чи навпаки різко посунути його до рамки, як амперметр покаже струм, що пробіжить колом. Чим швидше наближати чи віддаляти магніт від рамки, тим більшою буде значення максимального струму в імпульсі. Це явище отримало назву **електромагнітної індукції**. З описаного вище експерименту випливає, що величина генерованого чи індукованого струму в рамці пропорційна не самому магнітному полю, а швидкості його зміни.

Введемо поняття **потoku вектора магнітної індукції** через поверхню площею S , перпендикулярну до вектора індукції B_n

$$\Phi_B = \int_S B_n \cdot dS .$$

Е.Р.С., що генерується у контурі, який знаходиться у змінному магнітному полі, дорівнює

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}.$$

Що означає знак мінус у попередньому виразі і як визначити напрямок індукованого у контурі струму? Відповідь на це дає **правило Ленца**: індукційний струм у замкненому контурі має такий напрямок, що створюваний цим струмом власний магнітний потік протидіє тим змінам зовнішнього магнітного потоку, які збуджують індукційний струм.

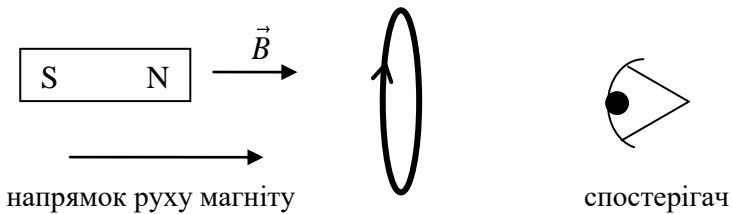


Рис. 5.4 Ілюстрація правила Ленца

Проілюструємо це правило рисунком 5.4. Якщо магніт наближається до контуру північним полюсом, вектор магнітної індукції і магнітний потік через контур зростають. Згідно з правилом Ленца, це має призвести до появи в контурі струму, чий магнітне поле протидіяло би такому зростанню. Тобто контур має генерувати магнітне поле, чий вектор індукції направлений в протилежний бік, вліво. Це можливо, якщо в контурі протікатиме струм за годинниковою стрілкою (з точки зору спостерігача, який знаходиться за контуром).

Магнітне поле Землі

Магнітне поле Землі подібне до поля стрижневого магніту, нахиленого на 11 градусів відносно вісі обертання Землі. Північний магнітний полюс Землі як магніту розташовано поблизу південного географічного полюсу Землі. Південний магнітний полюс Землі як

магніту – поблизу північного географічного полюсу. Середнє значення індукції магнітного поля Землі має порядок 10^{-5} Тл. Найбільш прийняте пояснення механізму виникнення магнітного поля Землі – так зване магнітне динамо. Рідке залізо – провідник, з якого складається зовнішнє ядро Землі, – знаходиться в постійному русі і таким чином створює електричний струм. Цей струм створює магнітне поле.

Магнітне поле Землі періодично переключається (тобто полюси міняються місцями), і ці зміни є симетричними (тобто нормальний і зворотній напрямки поля точно антипаралельні). Вищезгадане припущення використовується для реконструкції положень прадавніх континентів за напрямком стародавнього магнітного поля, зафіксованого намагніченими часточками гірських порід.

Магнітне поле захищає життя на Землі від сонячного вітру. Сонячний вітер – це потік швидких заряджених частинок, що виділяється із сонячної корони у навколишній простір. Магнітне поле Землі служить її щитом, перенаправляючи потік рухомих заряджених частинок навколо планети до магнітних полюсів нашої планети.

Методи георозвідки

За допомогою методів, що засновані на явищі електромагнітної індукції, можна досліджувати безліч об'єктів: наприклад, проводити розвідку мінералів і геотермальних ресурсів, здійснювати обстеження підземних вод, виявляти наявність геологічних та штучних порожнин і т.д.

Електромагнітні методи використовують відгук Землі на присутність зовнішнього магнітного поля. Змінне магнітне поле може бути згенеровано шляхом пропускання змінного струму через малий

сердечник, складений з багатьох витків провідників. Для геофізичних застосувань частота первинного змінного поля зазвичай становить сотні чи одиниці тисяч Гц (циклів на секунду). Змінне магнітне поле генератора може породжувати у земній товщі струми. Ці струми, в свою чергу, створюють навколо себе магнітне поле. Його можна зафіксувати за допомогою ще одного електричного контуру, в якому також буде генеруватися електричний струм. Електричний струм, генерований таким чином, є меншим за амплітудою, ніж первинний струм, і також зміщений відносно нього у часі.

Основною перевагою електромагнітних методів є те, що вони не потребують прямого контакту з землею, на противагу електричним методам постійного струму. Тому вимірювання електромагнітними методами можна проводити швидше, ніж вимірювання методами постійного струму.

Рівняння Максвела

Рівняння Максвела – це чотири рівняння, що описують, як присутність і рух заряджених частинок призводять до виникнення електричних та магнітних полів. Разом з рівняннями, що описують поведінку електричного і магнітного полів у речовині, чотири рівняння Максвела забезпечують все, що потрібно для розрахунку рівнянь руху частинок в електричному та магнітному полях.

$$\oint E_l dl = - \int_s \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) dS,$$
$$\oint B_n dS = 0.$$

Перше з них пов'язує значення \vec{E} зі змінами в часі вектора \vec{B} і є виразом закону електромагнітної індукції. Друге рівняння демонструє, що лінії індукції магнітного поля замкнуті, і те, що

магнітного монополя (наприклад, північного поля магніту, відокремленого від південного полюсу) не існує. Другу пару рівнянь складають рівняння :

$$\oint H_l dl = \int_S j_n dS + \oint \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right)_n dS ,$$

$$\oint D_n dS = \int_V \rho dV ,$$

тут j – густина струму, струм на одиницю площі перерізу провідника, ρ – об'ємна густина заряду, електричний заряд одиниці об'єму.

В усіх чотирьох рівняннях індекс l вказує на компоненту векторів \vec{E} і \vec{H} в напрямку dl , індекс n вказує на компоненту векторів \vec{B} і \vec{D} , що перпендикулярна до площі S .

Третє рівняння встановлює зв'язок між струмами та (породженого ними) магнітним полем. Четверте рівняння вказує на те, що лінії вектора \vec{D} починаються та закінчуються на зарядах, і те, що джерелом електричного поля є електричний заряд.

Для розв'язку системи рівнянь Максвела використовують ту обставину, що між величинами, які в них входять, виконуються наступні співвідношення:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E} ,$$

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

Величину \vec{D} називають **індукцією електричного поля**, а \vec{H} – **напруженістю магнітного поля**. Константа μ , магнітна проникність, характеризує магнітні властивості певної речовини.

Отож, змінне магнітне поле породжує змінне електричне поле, а змінне електричне поле породжує змінне магнітне поле. Таким

чином, якщо в якійсь точці простору відбулося «збурення» поля, то таке «збурення» може поширюватися у просторі. Його ми називаємо **електромагнітною хвилею**. Джерело електромагнітної хвилі – електричний заряд, що рухається нерівномірно (наприклад, здійснює коливання).

Математично хвиля описується за допомогою наступних двох рівнянь

$$E = E_{\max} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}x\right)$$

і

$$B = B_{\max} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}x\right)$$

Ці рівняння допомагають знайти значення напруженості поля \vec{E} і індукції магнітного поля \vec{B} в будь-якій точці x в будь-який момент часу t . Оскільки косинус – періодична функція, різні точки простору можуть мати однакове значення \vec{E} (і \vec{B}) в певний момент часу. Так само в одній і тій же точці простору з часом значення \vec{E} (і \vec{B}) гармонічно змінюється. Максимальне значення напруженості поля E_{\max} – **амплітуда** електричної складової хвилі. Максимальне значення індукції магнітного поля B_{\max} – амплітуда магнітної складової хвилі. Значення

$$\varphi = \frac{2\pi}{T}t_1 - \frac{2\pi}{\lambda}x_1$$

для певної точки простору x_1 у час t_1 – її **фаза**, вимірюється у радіанах. Відстань між двома сусідніми точками, у яких напруженість електричного поля має однакову величину і напрямок, називається **довжиною хвилі** (λ), одиниця вимірювання – метр. Час, за який напруженість поля у певній точці повертається до

попереднього значення, – **період хвилі** (T), одиниця вимірювання – секунда. Обернена до періоду хвилі величина – її частота

$$\nu = \frac{1}{T}.$$

Залежно від довжини хвилі різні електромагнітні хвилі мають різні назви:

Радіохвилі покривають величезну смугу частот, а їхні довжини варіюються від десятків сантиметрів до сотень метрів. Використовуються для передачі радіо- та телесигналів. *Мікрохвильове випромінювання* використовується для обробки їжі в мікрохвильових печах, а також для передачі інформації в радіолокаційному обладнанні. Типові довжини хвиль: від 1 мм до 1 см. *Інфрачервоне випромінювання*. Хоча ми і не можемо бачити такий тип електромагнітних хвиль, але можемо відчутти його як тепло. Типові довжини хвиль: 0,01 мм. *Видиме світло*, яке ми можемо побачити, – це всього лише крихітний шматочок електромагнітного спектра, з довжинами хвиль від 400 нм до 700 нм. *Ультрафіолетове випромінювання* має довжину хвилі коротшу, ніж у фіолетового світла, яку наші очі можуть виявити. Сонце є потужним джерелом ультрафіолетового випромінювання. *Рентгенівські промені* – корисний тип хвиль високої енергії, широко використовується в медицині та безпеці. Довжина хвиль від 1 нм до 100 нм. *Гамма-промені* – це найбільш енергійна та небезпечна форма електромагнітних хвиль. Гамма-промені виділяються з ядер деяких радіоактивних елементів і через високу енергію можуть пошкодити біологічні організми. Типові довжини хвиль – 1 пікометр (10^{-12} м).

Всі електромагнітні хвилі поширюються у вакуумі з однією і тією ж швидкістю: $c = 299\,792\,458$ м/с $\approx 3 \times 10^8$ м/с. Докладніше явища, пов'язані з поширенням електромагнітних хвиль, ми розглянемо в наступній лекції.

Лекція 6: Оптика

Оптика – це розділ фізики, що вивчає природу видимого електромагнітного випромінювання (світла), досліджує закони його поширення в різних середовищах і взаємодії з речовиною.

Досліджуються різноманітні аспекти поведінки світла: геометрична оптика вивчає закони розповсюдження світлових променів, хвильова – ті властивості світла, що обумовлені його хвильовою природою, а квантова оптика – частинкові властивості світла.

Геометрична оптика

Геометрична оптика вивчає закони поширення в просторі **світлових променів** – прямих, вздовж яких переноситься енергія електромагнітних хвиль.

Світлові промені поширюються у вакуумі зі швидкістю c , а в речовині з n разів меншою швидкістю

$$v = \frac{c}{n}.$$

Характеристику речовини, позначену n , називають **показником заломлення**. Так, для води показник заломлення складає 1,33, для скла 1,50, для алмазу – 2,42. Показник заломлення повітря за нормальних умов (тиск $1,0 \times 10^5$ Па, температура 273 К) складає 1,000277.

Основними законами геометричної оптики (рис. 6.1):

1. **Закон прямолінійного поширення світла.** В однорідному середовищі світло поширюється прямолінійно. Однорідне середовище – те, у всіх частинах якого показник заломлення однаковий.
2. **Закон відбивання світла.** Промінь падаючий, промінь відбитий і нормаль до поверхні в точці падіння лежать в одній

площині, а кут падіння світлового промені дорівнює куту відбивання. Тут кут падіння – це кут між нормаллю і падаючим променем, а кут відбивання – кут між нормаллю і відбитим променем.

3. Закон заломлення світла (також відомий як закон Снеліуса) Промінь падаючий, промінь заломлений і нормаль до поверхні в точці падіння лежать в одній площині. При будь-якому куті падіння відношення синуса кута падіння (i_1) до синуса кута заломлення (i_2) є величиною сталою для двох певних середовищ і дорівнює відношенню показника заломлення другого середовища (n_2) до показника заломлення першого (n_1). Тут кут падіння – це кут між нормаллю і падаючим променем, а кут заломлення – кут між нормаллю і заломленим променем.

Математично

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$

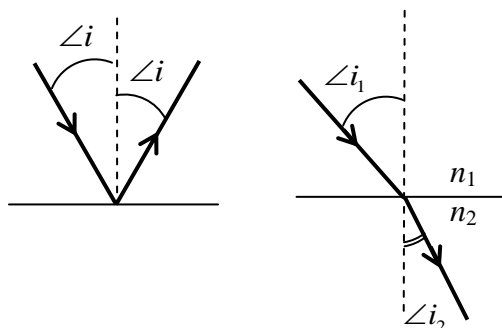


Рис. 6.1 Закони геометричної оптики

Показник заломлення середовища залежить від частоти світла. Показник заломлення прозорого середовища зменшується при збільшенні довжини хвилі, тобто у прозорій речовині синє світло рухається повільніше, ніж червоне світло. Залежність показника

заломлення середовища від частоти світла називають **дисперсією світла**. Дисперсія – явище, завдяки якому скляна призма розкладає біле світло на компоненти. Різні компоненти білого світла заломлюються склом на дещо різні кути і таким чином розділяються у просторі. Пояснення явища дисперсії лежить у взаємодії електронів у атомах із зовнішнім електричним полем.

Атмосферні явища, пов'язані з заломленням світла

Звернемо увагу, що, коли друге середовище більш оптично густе – тобто має більший показник заломлення, – то заломлений промінь лежить ближче до нормалі, ніж падаючий промінь. Коли ж друге середовище менш оптично густе, заломлений промінь лежить від нормалі далі, ніж падаючий промінь. В граничному випадку при достатньо великому куті падіння, кут заломлення може стати 90° . Тоді при подальшому збільшенні кута падіння світло не зможе потрапити у друге середовище взагалі. Кут падіння, при якому кут заломлення прямий, має назву критичного кута. Якщо падаючий кут більший за критичний, світло не може потрапити у друге середовище. Це явище отримало назву **повного внутрішнього відбивання**.

Явище повного внутрішнього відбивання дозволяє пояснити утворення міражів. Нижній міраж можна спостерігати над гарячою автострадою: здається, що на поверхні асфальту розлиті калюжі. Однак при наближенні до них виявляється, що асфальт сухий.

Міраж виникає, коли світло заломлюється у шарах повітря, що мають різні температури. Холодне повітря щільніше, ніж тепле, і тому має більший показник заломлення. Це означає, що, коли промінь світла проходить з прохолодного шару в гарячіший шар повітря, він все далі відхиляється від нормалі, так що для певного

шару повітря кут падіння променю перевищує критичний кут, і світло відбивається від такого шару (дивись рис. 6.2). Для спостерігача промені, здається, йдуть з землі. Це виглядає так само, як відбивання неба на поверхні води, що і створює ілюзію «мокрого» асфальту.

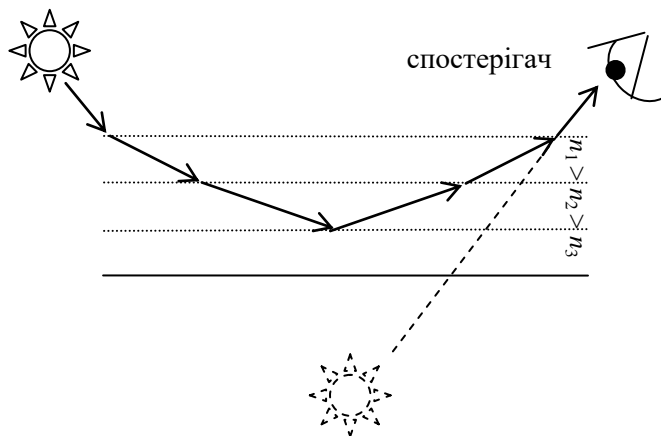


Рис. 6.2 Міраж

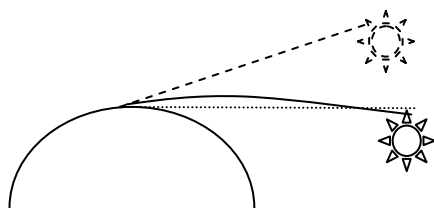


Рис. 6.3 Рефракційне подовження дня

Ще одним атмосферним явищем, пов'язаним із заломленням світла в атмосфері, є явище рефракційного подовження дня. Атмосфера Землі має різну щільність на різних висотах, отже, світло від Сонця може заломлюватися в атмосфері Землі (дивись рис. 6.3). В результаті відбувається уявне зміщення небесного світила. Сонце

насправді вже зайшло за горизонт, а ми все ще його бачимо. Для середніх широт рефракційне подовження дня складає порядку 10 хвилин, але на широті 89° таке подовження триває 3 години 42 хвилини. На полюсах завдяки рефракційному подовженню дня полярний день триває на 14 діб довше.

Хвильова оптика

Світло – це електромагнітна хвиля. Для нього характерні такі явища як інтерференція і дифракція. Розглянемо ці явища. Світлова чи електромагнітна хвиля – це розповсюдження коливань векторів напруженості електричного і магнітного полів в просторі і часі. Коли дві або більше хвиль накладаються, результуюче поле в будь-якій точці і в будь-який момент часу є сумою миттєвих значень полів, які були б присутніми в цій точці, якщо кожне з них діяло б окремо.

Хвилі, різниця фаз між якими в певній точці залишається сталою, називають **когерентними**. Когерентні електромагнітні хвилі мають однакову частоту.

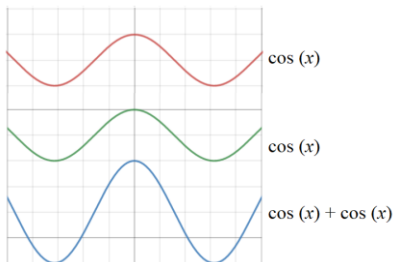
Якщо хвилі від двох або більше джерел приходять в точку у фазі, вони підсилюють одна одну: амплітуда результуючої хвилі є сумою амплітуд окремих хвиль. Для цього різниця у відстані, що проходять хвилі від джерела до місця, де вони накладаються, (так звана різниця ходу) має бути кратною довжині хвилі (рис. 6.4(а)),

$$r_1 - r_2 = m\lambda, \text{ де } m = 0, 1, 2, \dots$$

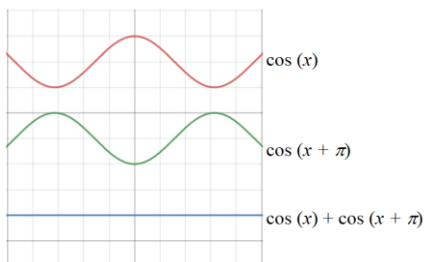
Хвилі можуть бути суміщеними й іншим чином: якщо різниця ходу між ними кратна половині довжини хвилі, то в певній точці хвилі завжди будуть у протифазі – максимум однієї хвилі суміщатиметься з мінімумом другої хвилі

$$r_1 - r_2 = m\frac{\lambda}{2}, \text{ де } m = 1, 3, 5, \dots$$

В результаті амплітуда результуючої хвилі в такій точці завжди дорівнюватиме нулю (рис. 6.4(б)).



(а)



(б)

Рис. 6.4 Результат інтерференції двох хвиль. (а) хвилі зсунуті одна від одної на 1 довжину хвилі, або на 0 радіан. Результат – інтерференційний максимум, (б) хвилі зсунуті одна від одної на половину довжини хвилі, або на π радіан. Результат – інтерференційний мінімум.

Хвилі, що випускаються двома різними джерелами світла, не є когерентними. Але якщо змусити хвилю від певного джерела пройти через два отвори, як показано на рисунку 6.5, то хвилі, що вийшли з отворів, будуть когерентними.

Розглянемо результат двопроменевої інтерференції досліду Юнга. Світло довжиною хвилі λ проходить через вузьку щілину S , а далі через дві щілини S_1 і S_2 , розташовані досить близько одна до одної на відстані d , що складає частини міліметра. Ці щілини слугують когерентними джерелами світла. Інтерференція спостерігається в області, в якій хвилі від цих джерел накладаються одна на одну. На екрані E ми бачимо чергування смуг з максимумом і мінімумом інтенсивності світла – тобто світлих і темних смуг. Центральна смуга ($m = 0$) – світла. Для m -ї за номером яскравої смуги, що

спостерігається під кутом θ від центральної смуги, виконується наступне співвідношення:

$$d \sin \theta = m\lambda, \text{ де } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Для m -ї за номером темної смуги, що спостерігається під кутом θ від центральної смуги, виконується наступне співвідношення

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda,$$

де $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

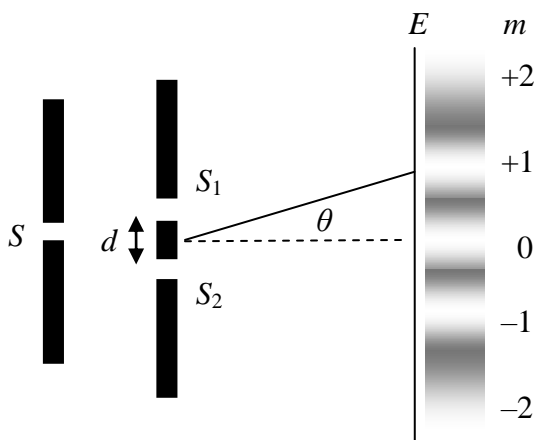


Рис. 6.5 Двопроменева інтерференція. Хід променів і вигляд інтерференційної картини

Всі звикли до того, що звук може огинати кути. Якщо звук не поведився би таким чином, ви б не могли почути людину, що стояла б за рогом будівлі. Світло теж може огинати кути. Коли світло від

монохроматичного точкового джерела падає на косинець і кидає тінь, край тіні не буде ідеально гострим. Натомість на краю тіні чергуються яскраві та темні смуги (рис. 6.6). Світло, що виходить з отвору, не веде себе точно згідно з прогнозами геометричної оптики.

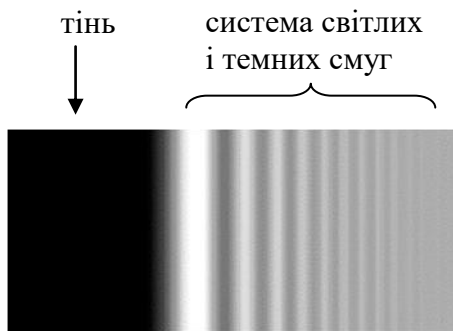


Рис. 6.6 Дифракція на косинці

Пояснити це явище можна за допомогою **принципу Гюйгенса-Френеля**: кожна точка фронту хвилі (поверхні, до якої розповсюдилася хвиля) є джерелом нової вторинної хвилі. Вторинні хвилі накладаються одна на одну, і огинаючи їх поверхня показує нове положення хвильового фронту (рис. 6.7). Цей принцип дозволяє визначати напрямок розповсюдження світлової хвилі, будувати хвильові поверхні в різних випадках.

Чому ж на краю тіні виникає система смуг? Вторинні хвилі є когерентними джерелами одна для одної. Відповідно, в результаті їх накладання утворюється інтерференційна картина – система світлих і темних смуг! Положення цих смуг залежить від параметрів системи: ширини щілини, кількості щілин, що продукують вторинні хвилі, відстані на якій спостерігається **дифракційна** (а, по-суті, інтерференційна) картина.

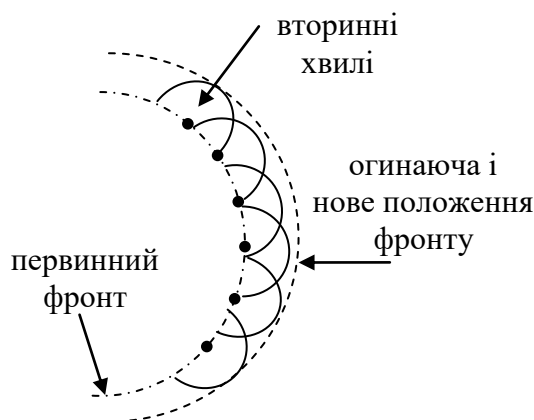


Рис. 6.7 Принцип Гюйгенса-Френеля

Розглянемо окремий випадок дифракції, отриманої за допомогою дифракційної ґратки. **Дифракційна ґратка** – це система плоских щілин однакової ширини, що знаходяться на однакових відстанях (d). Щілини тонкі і знаходяться дуже близько одна від одної – на відстанях порядку мікрометра.

Для m -ї за номером яскравої смуги, що спостерігається під кутом θ від центральної смуги, виконується наступне співвідношення

$$d \sin \theta = m\lambda ,$$

де $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Положення максимумів дифракційної картини для різних компонент білого світла – різні, тому дифракційну ґратку можна використовувати для розкладання білого світла на спектр.

Квантова оптика

Не усі явища, пов'язані зі світлом, можна пояснити за допомогою хвильової теорії світла. Розглянемо, наприклад, явище фотоелектру (рис. 6.8).

Якщо на металеву пластинку спрямувати промінь світла, з її поверхні можна вибити електрони. Лабораторні установки з вивчення фотоелектру дозволяють оцінити кінетичну енергію цих електронів та струм, який утворюється потоком вибитих електронів. Хвильова модель світла передбачає, що збільшення амплітуди світла збільшувало б кінетичну енергію випромінюваних електронів, а збільшення частоти призводило би до збільшення швидкості випромінюваних електронів, тобто до збільшення вимірюваного струму.

Але на практиці відбувається зовсім протилежне! Експерименти показали, що збільшення частоти світла збільшує кінетичну енергію фотоелектронів, а збільшення амплітуди світла збільшує струм. Більше того, електрони зовсім не вибиваються з поверхні металу навіть дуже потужним джерелом світла, коли частота цього світла менше певної величини.

На основі цих висновків Альбертом Ейнштейном було запропоновано наступне пояснення: світло поводить ся як потік частинок (що називають квантами світла, або фотонами), кожна з яких переносить енергією, пропорційну частоті світла, що утворює цей потік $E = h\nu$ де ν – частота світла, а $h = 6,63 \times 10^{-34}$ Дж.с.

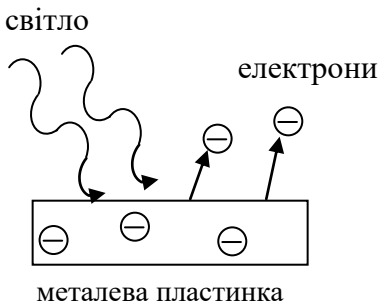


Рис. 6.8 Явище фотоелектру

Отож, світло має і хвильову, і корпускулярну (частинкову) природу!

Якщо електромагнітна-хвиля теж має корпускулярну природу, то чи мають об'єкти, які ми вважаємо частинками, хвильову природу? Чи є електрон хвилею? А молекула? Так! Будь-якому об'єкту, що рухається, можна приписати довжину хвилі, яка визначається за формулою

$$\lambda = \frac{h}{mv},$$

де h – стала Планка, m – маса частинки, v – її швидкість.

Експериментально вчені спостерігали інтерференцію і дифракцію електронів, атомів натрію, а також дифракцію фулеренів – нано-частинок, що складаються з 60 атомів карбону.

Лекція 7: Фізика атома

Будова атому

Матерія складається з атомів. Але з чого складаються самі атоми? І як про це дізналися вчені? Наприкінці 19-го століття найкращою моделлю атому, якою послуговувалися вчені, була так звана модель Томсона, або модель «сливового пудингу». Вважалося, що атом складається з позитивно зарядженої речовини «пудингу», в якій рівномірно розподілені від'ємно заряджені «сливи» (рис. 7.1(a)).

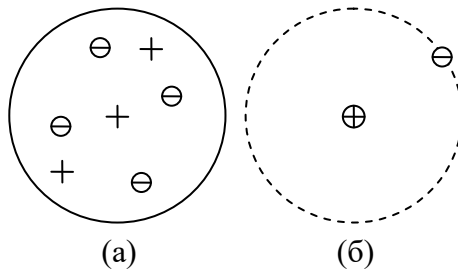


Рис. 7.1 Модель атома (а) Томпсона (б) Резерфорда

Для того, щоб підтвердити або спростувати цю модель експериментально, англійський вчений Ернест Резерфорд спрямував пучки альфа-частинок (які є ядрами атомів гелію і, отже, є позитивно зарядженими) на тонку золоту фольгу і спостерігав, як саме альфа-частинки будуть розсіюватися на фользі. Розсіюватися – означає змінювати напрям руху. То як повели себе альфа-частинки? Скільки з них пролетіло скрізь фольгу, не змінюючи напрямку руху, скільки відхилилося на певний кут?

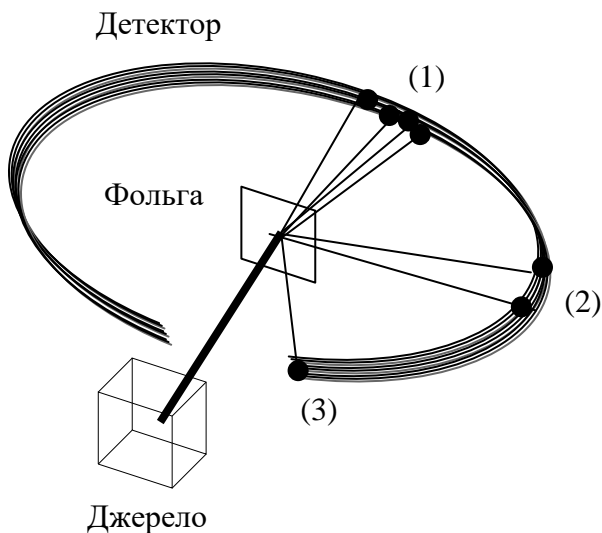


Рис. 7.2 Дослід Резерфорда

Основні три результати дослід Резерфорда були такими (рис. 7.2): більшість швидких, заряджених альфа-частинок проходили просто наскрізь через фольгу (1). Якщо б вірною була модель «сливового пудинга», то так мали б поводитись абсолютно всі частинки. Деякі альфа-частинки відхилялись після проходження крізь фольгу на великі кути (2). Це вже було неочікувано. Нарешті дуже мала кількість альфа-частинок відхилялася просто назад (3)! Такий результат був точно несумісним з моделлю Томпсона. Резерфорд пізніше зауважив: «Це було так само неймовірно, як якщо б ви вистрілили 15-дюймовим снарядом в аркуш паперу і снаряд би відстрибнув назад, прямо на вас!»

Результати експерименту можна пояснити, якщо припустити інший склад атому. У цій моделі позитивно заряджена речовина сконцентрована у невеликій, але масивній області, названій ядром.

Для довершення цієї моделі треба було б розташувати від'ємно заряджені частинки (електрони) навколо ядра так, щоби не дозволити певному атому проникнути в простір, вже зайнятий іншими атомами. На жаль, діаграма, наведена на рис. 7.1(б), не дозволяє зобразити будову атому в правильному масштабі, адже розмір атома ($\sim 10^{-10}$ м) на декілька порядків перевищує розмір ядра ($\sim 10^{-15}$ м). Так, якщо б ядро було розміром з горіх, то атом був би розміром із футбольний стадіон.

Оскільки маси ядер різних елементів різні, Резерфорд висловив припущення, що ядро складається з певної кількості позитивно заряджених частинок – протонів. Причому кількість протонів у нейтральному атомі завжди дорівнює кількості електронів. Резерфорд також постулював, що в ядрі атомів, крім заряджених частинок, містяться нейтральні масивні частинки. Цей висновок був зроблений внаслідок невідповідності між атомним номером елемента (кількістю протонів чи кількістю електронів у атомі) та його атомною масою. Було виявлено, що берилій, коли його бомбардують альфа-частинками, випускає високоенергетичний потік випромінювання. Якщо спрямувати це випромінювання, на речовину, багату протонами (наприклад, на парафін), воно вибиває з цієї речовини потік протонів. У 1932 Джеймс Чедвік запропонував, що потік, що вибивається з берилію, є саме потоком нейтронів, чие існування було передбачене Резерфордом. Використовуючи закони динаміки, Чедвік зміг визначити швидкість протонів, вибитих з парафіну. Потім, застосувавши закон збереження імпульсу, він зміг визначити, що маса нейтронів майже точно така ж, як і маса протонів.

Явище радіоактивності. Властивості альфа-, бета- та гама частинок

В ядрах з однією і тією ж кількістю протонів може знаходитися різна кількість нейтронів. Атом з певним набором протонів та нейтронів –

нуклід. Ізотопами називають нукліди з однією і тією ж кількістю протонів та різною кількістю нейтронів. Експериментально встановлено, що деякі нукліди існують лише протягом певного часу. Явище спонтанного перетворення нестійкого ізотопу хімічного елементу в ізотоп іншого хімічного елементу називають **радіоактивністю**. В результаті радіоактивного розпаду ядра воно розпадається на декілька фрагментів, випускаючи з себе так звані альфа-, бета- чи гама-частинки.

Коротко опишемо властивості цих частинок. **Альфа частинки** представляють собою ядра гелію-4. Вони позитивно заряджені, масивні, їхня початкова швидкість становить біля 5% від швидкості світла. Через малу швидкість та великий заряд, випущені з ядра, вони пролітають невелику відстань. Через декілька сантиметрів польоту в повітрі альфа-частинки іонізують сусідні атоми (відривають електрони у навколишніх нейтральних атомів), стаючи нейтральними атомами гелію. Оскільки альфа-частинки є зарядженими, у русі вони відхиляються магнітним полем.

Бета частинки – це, насправді, електрони. Їхня маса значно менша за масу альфа-частинок, вони від’ємно заряджені. Радіоактивні ізотопи випускають бета-частинки, які мають початкову швидкість порядку 60% від швидкості світла. Така комбінація властивостей дозволяє бета-частинкам пролетіти в повітрі довшу відстань – до одного метру. Бета-частинки заряджені, отже, у русі теж відхиляються магнітним полем, але в протилежний бік, ніж це роблять альфа-частинки.

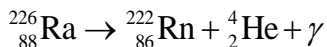
Нарешті, **гама-частинки** – це кванти електромагнітного випромінювання, фотони. Їхня маса, як і заряд дорівнюють нулю. Вони рухаються зі швидкістю світла. Зупинити потік гама частинок важко – 5 мм свинцю зможе поглинути лише 90% гамма-фотонів у потоку.

Назви типів розпаду збігаються з типами частинок, що випускає атом, який розпадається. Під час будь-якого з типів розпаду зарядове

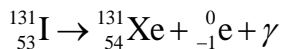
число (число протонів у атомі) і масове число (число протонів та нейтронів у атомі) частинок зберігаються. Нижче приведені два приклади радіоактивних розпадів.

Альфа-розпадом називають спонтанний розпад атомного ядра на ядро-продукт і альфа-частинку. Альфа-розпад, як правило, є властивістю важких ядер з масовим числом, що перевищує 100. Дочірнє ядро, що утворилося в результаті альфа-розпаду, часто також виявляється радіоактивним. Процес радіоактивного розпаду триває доти, поки в результаті не з'явиться стабільне, нерадіоактивне ядро. Часто при альфа-розпаді також відбувається викид гамма-частинок.

Нижче наведено рівняння розпаду ізоотопу радію з утворенням ізоотопу радону, альфа-частинки та гамма-частинки. Верхнім індексом показана загальна кількість протонів і нейтронів у нукліді, нижнім – кількість його протонів.



В результаті бета-розпаду атомне ядро спонтанно розпадається на ядро-продукт і бета частинку. Нижче приведені рівняння радіоактивного розпаду ізоотопу йоду з утворенням атома ксенону, бета-частинки та гамма-частинки.



Закон радіоактивного розпаду

Активність зразка – це середнє число розпадів в секунду; одиниця вимірювання активності – бекерель (Бк). Один бекерель – це один розпад у секунду. Активність радіоактивного зразка спадає з часом за **законом радіоактивного розпаду**. Цей закон визначає активність зразка A в будь-який момент часу t відносно початкової активності A_0

$$A = A_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}.$$

Період напіврозпаду $T_{1/2}$ визначається як час, протягом якого активність зразка зменшується вдвічі (рис. 7.3).

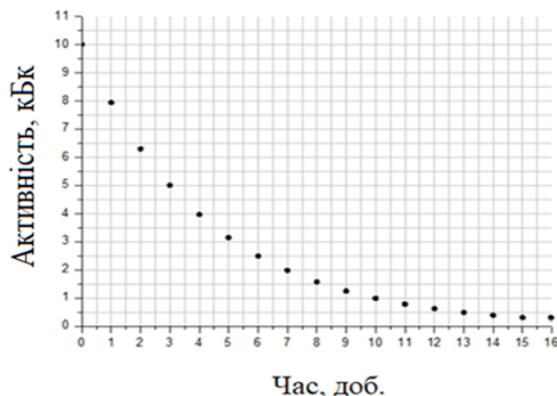


Рис. 7.3 Залежність активності радіоактивного зразка від часу

Радіоізотопне датування

Методи радіоізотопного датування дозволяють встановити вік зразку, володіючи інформацією про період напіврозпаду певного ізотопу та його вміст у зразку. Радіовуглецевий аналіз є різновидом радіоізотопного датування, який можна застосувати до матерії, яка була колись живою і знаходилася в рівновазі з атмосферою, приймаючи вуглекислий газ з повітря для фотосинтезу. Космічні промені вибивають з нейтральних атомів іоносфери нейтрони, які, у свою чергу, бомбардують атоми азоту – головну складову атмосфери Землі. Це бомбардування нейтронами призводить до формування радіоактивного ізотопу карбону-14. Радіоактивний карбон-14 з киснем утворюють вуглекислий газ, що включений у цикл живих істот.

Атоми карбону-14 утворюються зі сталою швидкістю, тож, вимірюючи активність колись живої речовини та порівнюючи її активність з рівноважним рівнем активності карбону-14 живих істот, можна виміряти проміжок часу, що пройшов з того моменту, як ця жива істота загинула.

Період напіврозпаду карбону-14 складає $5\,730 \pm 30$ років, тому радіовуглецевий аналіз може бути використаний для датування артефактів віком до 50–60 тисяч років. Для датування більш давніх об'єктів, а також датування неорганічних зразків використовують і інші методи, наприклад, рубідій-стронцієве датування. В результаті розпаду у гірській породі ^{87}Rb , формується ізоотп ^{87}Sr . Природний вміст цього ізоотпу відомий і достатньо малий, біля 7%, тому, порівнюючи відношення вмісту в породі ізоотпів ^{87}Sr і ^{86}Sr , можна визначити вік зразка.

Список рекомендованої літератури

Основна література

1. Кучерук І.М. та інші (2006) *Загальний курс фізики в 3-х томах*, Київ, Техніка
2. Савельєв І.В. (1970) *Курс общей физики в 3-х томах*, Москва, Наука
3. Янг Г., Фрідман Р. (2009) *Фізика для університетів*, Львів, Наутікус

Додаткова література

1. Bauer, W., Westfall, G. (2014) *University Physics with Modern Physics*, New York, N.Y., McGraw-Hill
2. Лисица М.П., Валах М.Я. (2002) *Занимательная оптика: атмосферная и космическая оптика*, Киев, Логос
3. Lowrie, W. (2007) *Fundamentals of Geophysics*, Cambridge, NY, Cambridge University Press