

**Міністерство освіти і науки України
Одеський державний екологічний університет**

Є.А. Галич, Т.Є. Расторгуєва

ФІЗИКА

**Конспект лекцій
Частина 2**

для дистанційної форми навчання на підготовчому відділенні

Одеса 2018

Р 24
УДК 53

Друкується за рішенням Методичної Ради Одеського державного екологічного університету (протокол №__ від _____ 2017).

Галич Є.А., Расторгуєва Т.Є.

Фізика: конспект лекцій / Одеський державний екологічний університет. Одеса: ОДЕКУ, 2018 р. - 108с.

У конспекті лекцій міститься необхідний обсяг навчальної інформації, що забезпечує засвоєння основ курсу фізики та поглиблення знань в області тих явищ і законів фізики, які необхідні студентам під час навчання у навчальному закладі вищої освіти.

Розділи «Молекулярна фізика і термодинаміка», «Електродинаміка», «Електромагнетизм» адаптовані максимально та розраховані на вивчення фізики. У конспекті широко представлений наочний матеріал: структурно - логічні схеми, таблиці, графіки, рисунки. Містяться питання для самоперевірки.

Зміст конспекту відповідає «Програмі зовнішнього незалежного оцінювання з фізики», Київ, 2011р., [16].

© Одеський державний
екологічний університет, 2018

ПЕРЕДМОВА

Дисципліна «Фізика» відноситься до загальноосвітніх навчальних дисциплін і викладається для слухачів Підготовчого відділення.

Головною метою цього конспекту лекцій є допомога слухачам підготовчого відділення (абітурієнтам) у підготовці до державної підсумкової атестації з фізики, зовнішнього незалежного оцінювання.

Конспект лекцій, підготовлений для самостійної роботи слухачів на підготовчому відділенні з дисципліни «Фізика» для дистанційної форми навчання, складається з таких тем:

Тема 1. Основи кінематики.

Тема 2. Основи динаміки.

Тема 3. Закони збереження в механіці. Елементи механіки рідин і газів.

Тема 4. Молекулярна фізика і термодинаміка.

Тема 5. Електродинаміка.

Тема 6. Електромагнетизм. Коливання та хвилі.

Тема 7. Оптика. Елементи теорії відносності. Квантова фізика.

Лекції призначені для того, щоб в максимально короткій та акцентованій формі викласти всю необхідну інформацію з певної теми, обсяг якої регламентується програмою зовнішнього незалежного оцінювання з предмету «Фізика». Теоретичний блок включає матеріал, який розкриває зміст основних фізичних параметрів, термінів і законів з відповідної теми.

Запитання і тести для самоперевірки призначені для оцінки обсягу засвоєння матеріалу після опрацювання лекційного матеріалу.

Контрольні роботи. По кожній із семи тем передбачається по одній контрольній роботі.

Контроль знань і вмінь слухачів системи довузівської підготовки, які навчаються за заочною формою, здійснюється за допомогою системи контрольних заходів. Вони складаються із заходів *поточного* та *підсумкового* контролю.

Поточний контроль здійснюється протягом усього навчального року (1 листопада – 1 травня) та включає заходи контролю самостійної роботи слухача під час вивчення навчальної дисципліни поза межами університету, а саме, виконання контрольних робіт.

Контроль самостійної роботи слухачів заочної форми навчання полягає у використанні дистанційних методів, які передбачають застосування сучасних інформаційно-комунікаційних засобів організації контролю, а саме:

- ✓ поетапне відправлення слухачем виконаних завдань контрольної роботи та отримання зауважень від викладача в режимі «*оф-лайн*» через мережу Інтернет;
- ✓ виконання завдань самостійної роботи безпосередньо в режимі «*он-лайн*» через мережу Інтернет за допомогою Moodle;
- ✓ спілкування (консультації) викладача зі слухачами в режимах «*оф-лайн*» і «*он-лайн*» через Інтернет у заздалегідь визначені дати і години, що може передбачати як відповіді на запитання слухачів щодо окремих тем, пунктів завдань, так і сумісне обговорення найбільш складних тем теоретичного матеріалу, контрольних або курсових робіт тощо.

У випадку, якщо слухач має накопичену суму балів поточного контролю не меншу ніж 60% від максимально можливої суми – 100 балів, він допускається до підсумкового контролю.

Підсумковий контроль здійснюється під час екзаменаційної сесії та має на меті встановлення рівня знань і вмінь, які опанував слухач після вивчення навчальної дисципліни. Форма підсумкового контролю – іспит.

Максимальна сума балів, яку може отримати слухач на іспиті, становить 100 балів. Кожен білет вміщує 20 тестових запитань, кожна правильна відповідь оцінюється в 5 балів.

- «**задовільно**» - слухач повинен мати оцінку на іспиті не меншу ніж 60% від максимально можливої суми 100 балів;

- «**добре**» - слухач повинен мати оцінку на іспиті не меншу ніж 74% від максимально можливої суми 100 балів;

- «**відмінно**» - слухач повинен мати оцінку на іспиті не меншу ніж 90% від максимально можливої суми 100 балів;

Контроль самостійної роботи слухача заочної форми навчання здійснюється шляхом вивчення розділів дисципліни за графіком, який надається в табл. 1 перевірки контрольної роботи, яка реєструється Підготовчим відділенням у встановлені строки та надається слухачем на кафедру довузівської підготовки й на заходах підсумкового контролю, передбачених навчальним планом.

Таблиця 1– Терміни перевірки контрольних робіт.

| Перелік тем лекцій | №КР | Строки контролю |
|---|-------|-----------------|
| 1. Основи кінематики | КР №1 | 15.01-31.01 |
| 2. Основи динаміки | КР №2 | 01.02-15.02 |
| 3. Закони збереження в механіці. Елементи механіки рідин та газів. | КР №3 | 16.02-28.02 |
| 4. Молекулярна фізика і термодинаміка. | КР №4 | 01.03-15.03 |
| 5. Електродинаміка. | КР №5 | 16.03-31.03 |
| 6. Електромагнетизм. Коливання та хвилі. | КР №6 | 01.04-15.04 |
| 7. Оптика. Елементи теорії відносності. Квантова фізика. | КР №7 | 16.04-30.04 |

Під час вивчення дисципліни або виконання контрольних робіт звертатись до викладача на електронну адресу odeku_dp@gmail.com, закріплену за дисципліною, або зателефонувати на кафедру довузівської підготовки за тел. 42-77-64.

ЗМІСТ

| | |
|---|-----------|
| Вступ..... | 9 |
| 7. Молекулярна фізика і термодинаміка..... | 11 |
| 7.1 Основні положення молекулярно-кінетичної теорії..... | 11 |
| 7.1.1 Основні параметри молекулярно-кінетичної теорії..... | 12 |
| 7.1.2 Теплові явища. Температура..... | 14 |
| 7.1.3 Особливості теплового руху частинок..... | 16 |
| 7.1.4 Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу (рівняння Клаузіуса)..... | 17 |
| 7.2 Основи кінетичної теорії газів | 19 |
| 7.2.1 Рівняння стану ідеального газу (рівняння Клайперона - Менделєєва) | 19 |
| 7.2.2 Газові закони | 19 |
| 7.2.3 Закон Дальтона | 23 |
| 7.3 Основи термодинаміки | 25 |
| 7.3.1 Внутрішня енергія та її зміна при теплопередачі й здійсненні роботи | 26 |
| 7.3.2 Перший закон термодинаміки. Адіабатичний процес | 33 |
| 7.3.3 Другий закон термодинаміки | 34 |
| 8. Агрегатний стан речовини. Властивості речовини в різних агрегатних станах | 39 |
| 8.1 Агрегатний стан речовини | 39 |
| 8.2 Теплове розширення твердих і рідких тіл | 40 |
| 8.3 Фазові переходи | 41 |
| 8.4 Властивості твердих тіл | 43 |
| 8.5 Властивості рідин | 45 |
| 8.6 Властивості пари | 48 |
| 9. Основи електродинаміки | 52 |
| 9.1 Електростатика | 52 |
| 9.1.1 Електричний заряд. Електризація тіл. Закон збереження заряду | 52 |
| 9.1.2 Взаємодія зарядів. Закон Кулона | 53 |
| 9.1.3 Електричне поле. Електростатичне поле. Напруженість електричного поля. Принцип суперпозиції полів | 54 |
| 9.1.4 Робота в електростатичному полі. Потенціал поля. Різниця потенціалів двох точок поля. Напряга | 57 |
| 9.1.5 Електричне поле в речовині | 61 |
| 9.1.6 Електрична ємність. Конденсатори. Енергія електричного | 64 |

| | | |
|------------|--|------------|
| | поля | |
| 9.2 | Постійний електричний струм | 69 |
| 9.2.1 | Електричний струм. Закон Ома. Сила струму. Густина струму | 69 |
| 9.2.2 | Опір металевих провідників. Провідність | 70 |
| 9.2.3 | Електрорушійна сила (ЕРС) | 71 |
| 9.2.4 | Електричний ланцюг | 72 |
| 9.2.5 | Закон Ома | 73 |
| 9.2.6 | Способи з'єднання провідників | 74 |
| 9.2.7 | З'єднання джерел електроживлення (джерел ЕРС) | 77 |
| 9.2.8 | Робота і потужність струму. Закон Джоуля-Ленца | 78 |
| 9.3 | Струми провідності | 81 |
| 9.3.1 | Електричний струм в металах. Контактна різниця потенціалів | 81 |
| 9.3.2 | Електричний струм в електролітах. Закони електролізу | 81 |
| 9.3.3 | Електричний струм в газах. Газовий розряд. Поняття про плазму | 84 |
| 9.3.4 | Електричний струм у вакуумі (струм перенесення) | 85 |
| 9.3.5 | Електричний струм в напівпровідниках | 86 |
| 10. | Електромагнетизм | 92 |
| 10.1 | Магнітне поле. Магнітна індукція | 92 |
| 10.1.1 | Магнітна індукція прямого, колового струму та соленоїда | 93 |
| 10.1.2 | Дія магнітного поля на провідник із струмом | 94 |
| 10.1.3 | Закон взаємодії паралельних струмів | 95 |
| 10.1.4 | Дія магнітного поля на рухомий заряд (сила Лоренца) | 97 |
| 10.1.5 | Магнітний потік | 99 |
| 10.1.6 | Магнітне поле в речовині | 100 |
| 10.2 | Електромагнітна індукція | 101 |
| 10.2.1 | Явище електромагнітної індукції | 101 |
| 10.2.2 | Самоіндукція. Індуктивність. Взаємна індукція. Енергія магнітного поля | 103 |
| | Література | 108 |
| | Додаток | 110 |

ВСТУП

Фізика—найважливіша наука, щовивчаєнайглибшізакониприроди. Вона вивчаєнайпростіші і разом з тимнайбільшзагальнівластивостінавколишньогоматеріальногосвіту. Тому поняттяфізики і їїзакони лежать в основі будь-якогорозділуприродознавства.

Сучаснафізична картина світу— квантово-польова.

Теоретична основа – квантово-релятивістська.

Поділматерії на речовину і поле умовний.

Корпускулярно-хвильовийдуалізмпритаманнийусім видам матерії.

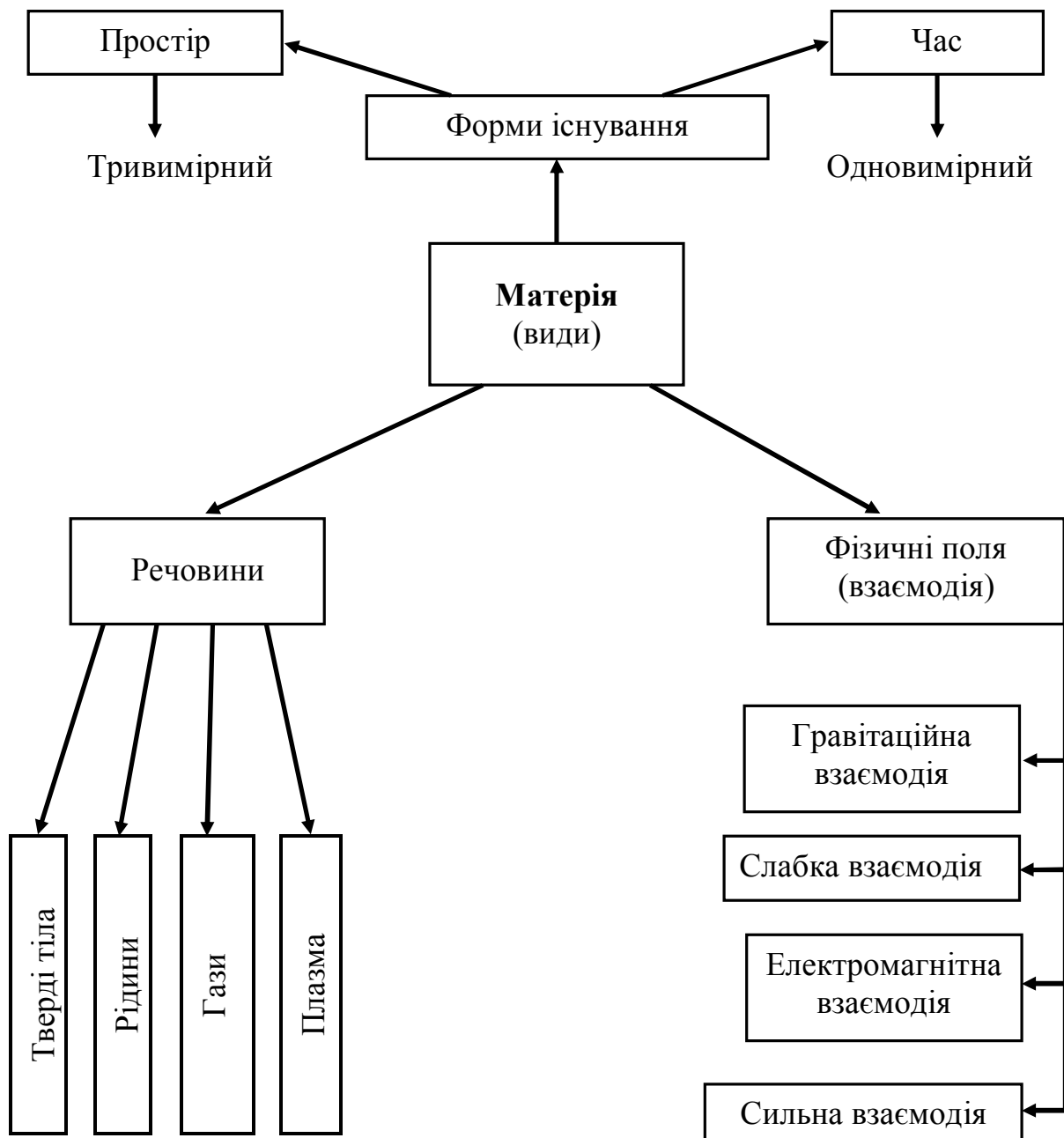


Рис. В1 – Фізична карта світу

Матерія – це категорія філософії, яка позначає об'єктивну реальність.
 Всі об'єкти природи – це матеріальні об'єкти.

Є два види матерії – речовина і поле. Наприклад, вода – це речовина, світло – це поле.

Речовина – це матеріальний об'єкт, який має масу спокою.

Поле – це матеріальний об'єкт, який не має маси спокою.

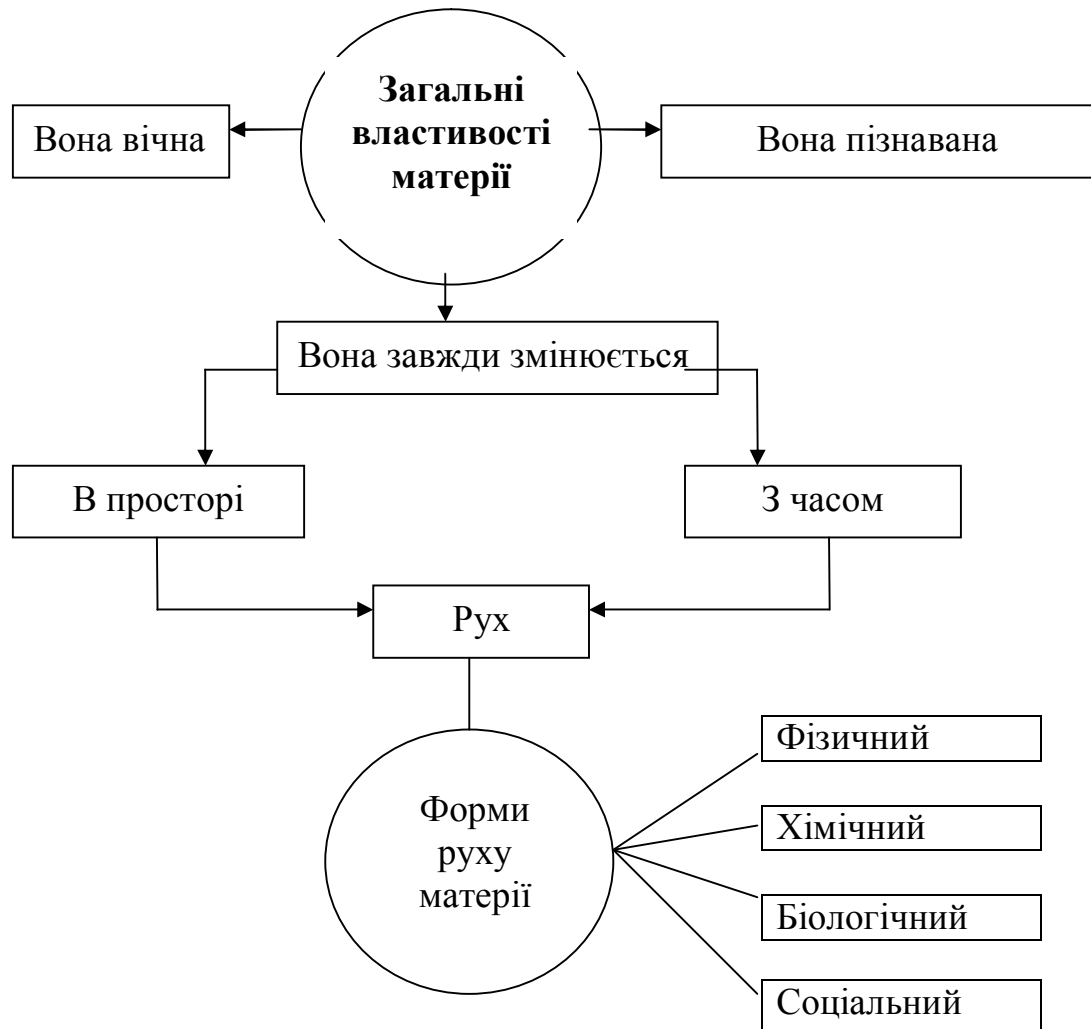


Рис. В2 – Загальні властивості та форми руху матерії

Будь-яка зміна матерії (в просторі і в часі) називається рухом.
 Матерія існує тільки в русі і не може існувати без нього.

Зміна стану (властивості, рух) матеріальних об'єктів спричиняється взаємодією об'єктів.

Фізика вивчає фізичні властивості матеріальних об'єктів і фізичні форми руху матерії (фізичні явища).

7 МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА

Молекулярно-кінетична теорія – це наукова теорія, яка пояснює теплові явища, фізичні властивості тіл і речовин в різних агрегатних станах на основі їх молекулярної будови, взаємодії та руху частинок.

Засновником молекулярно-кінетичної теорії є *Демокрит* (V – IV ст. до нашої ери), *М.В. Ломоносов* (XVIII ст.).

7.1 Основні положення молекулярно-кінетичної теорії

I положення. Всі речовини складаються з молекул або інших структурних одиниць (атомів, іонів і електронів), розділених проміжками. Доказом дискретного стану речовини є фотографії, отримані за допомогою іонного, електронного й тунельного мікроскопів. Про наявність проміжків між молекулами свідчить зміна об'єму твердих тіл і рідин при зміні їх температури.

II положення. Молекули або інші структурні частинки знаходяться в безперервному хаотичному русі. Підтвердженням цього положення є явища дифузії, осмосу, броунівського руху.

Дифузія – це процес перерозподілу концентрації атомів в просторі завдяки хаотичній, тобто тепловій міграції.

Осмос – однобічна дифузія.

Броунівський рух – хаотичний рух завислих в рідині або газі частинок твердого тіла. Відкрито в 1827 р. англійським ботаніком Р. Броуном. Спостерігається в оптичний мікроскоп із збільшенням $\Gamma \approx 500$. Пояснюється поштовхами молекул, що оточують частинку, внаслідок їх нерегульованого теплового руху.

III положення. Молекули або атоми одночасно притягуються та відштовхуються, а рівнодійна цих сил називається силою молекулярної взаємодії. Доказом є виникнення пружних сил при деформації тіл, виникнення сил поверхневого натягу.

Сили молекулярної взаємодії є силами притягання відштовхування, які залежать від відстані між молекулами та виникають внаслідок взаємодії електричних зарядів, що входять до їх складу. Ці сили є короткодійними.

Графік залежності сили молекулярної взаємодії $F_{м.в.}$ від відстані між молекулами для простих молекул наведений на рис. 7.1.

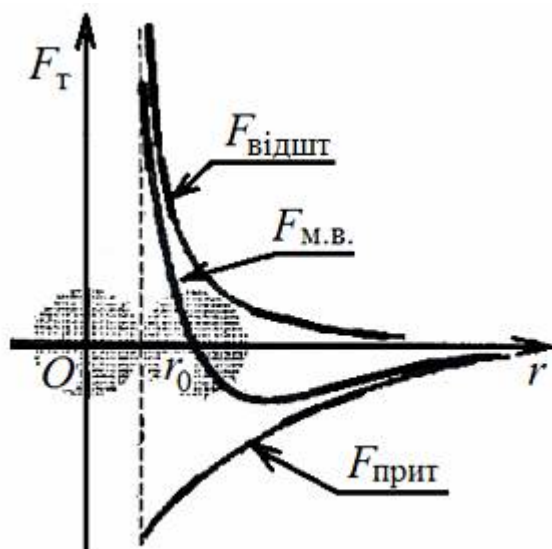


Рис. 7.1

При $r = r_0 \approx d_m$ (d_m – діаметр молекули) молекули знаходяться в рівновазі.

При $r < r_0$ переважають сили відштовхування.

При $r > r_0$ переважають сили притягання.

При $r \approx 10 r_0$ сили тяжіння мізерно малі, тому ними можна знехтувати.

Отже, сфера молекулярної взаємодії $\approx 10^{-9}$ м.

Прості молекули – це 1-3-атомні молекули, які можна

представити у вигляді кульки певного діаметра $d_0 \approx 10^{-10}$ м.

7.1.1 Основні параметри молекулярно-кінетичної теорії

Атом – найменша частинка, що не ділиться при хімічних реакціях, наприклад: H, Na, Cl, C, O.

Молекула – найменша стійка частинка речовини, що зберігає його основні хімічні властивості. Вона складається з атомів однакових або різних хімічних елементів, наприклад: H_2 , NaCl, $C_6H_{12}O_6$.

Сукупність молекул зберігає фізичні властивості речовини.

Речовина – це те, з чого складається фізичне тіло.

Відносною молекулярною масою M_r називають відношення маси молекули m_0 до $1/12$ мас атома вуглецю m_{0C} (атомної одиниці маси а.о.м.):

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0C}} \quad (7.1)$$

де M_r – безрозмірна величина.

Відносна молекулярна маса молекули визначається за допомогою періодичної системи елементів Д.І. Менделєєва, де вказані відносні атомні маси.

Один моль – кількість речовини, в якій міститься стільки ж молекул або атомів, скільки атомів міститься в ізотопі вуглецю $^{12}_6C$ масою 0,012 кг.

- **Стала Авогадро (N_A)** число атомів або молекул в 1 молі будь-якої речовини:

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}. \quad (7.2)$$

- Згідно із **законом Авогадро** 1 моль ідеального газу за нормальних умов ($p_0 = 1,01 \cdot 10^5$ Па, $T = 273$ К) займає об'єм:

$$V_M = 22,4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}. \quad (7.3)$$

- **Молярна маса** - маса одного моля речовини:

$$M = m_0 N_A \text{ або } M = M_r \cdot 10^{-3} \quad [M] = 1 \text{ кг/моль}. \quad (7.4)$$

- **Маса молекули** (у кг), виражена через молярну масу:

$$m_0 = \frac{M}{N_A}. \quad (7.5)$$

- **Маса тіла** (у кг), виражена через масу однієї молекули та число молекул N :

$$m = m_0 N. \quad (7.6)$$

- **Кількість речовини (ν)** – відношення числа молекул (N) в даному тілі до сталої Авогадро (N_A), тобто до молекул в 1 молі речовини:

$$\nu = \frac{N}{N_A}, \quad [\nu] = 1 \text{ моль}. \quad (7.7)$$

Кількість речовини ще можна визначити через відношення маси речовини до її молярної маси:

$$\nu = \frac{m}{M}. \quad (7.8)$$

- **Концентрація (n)** дорівнює числу частинок в одиниці об'єму:

$$n = \frac{N}{V}, \quad [n] = 1 \text{ м}^{-3}. \quad (7.9)$$

7.1.2 Теплові явища. Температура

Фізичні процеси, пов'язані з нагріванням або охолодженням тіл, зміною їх агрегатного стану, називають тепловими явищами.

При вивченні теплових явищ вводиться фізична величина – температура.

Температура – це величина, що характеризує теплову рівновагу системи. У всіх частинах системи, яка знаходиться в тепловій рівновазі, температура однакова й відлічується від стану, взятого за нульовий.

Температура вимірюється рідинними або газовими термометрами, відповідним чином градуйованими. Температура вимірюється оптичними (а спектромвипускання) або електричними термометрами (напівпровідникові термістори, термопари).

У міжнародній практичній шкалі температур за нуль (0°C) вважається температура танення льоду, а за 100°C – температура кипіння води при нормальному атмосферному тиску ($p_0 = 1013,2$ гПа). 1/100 цього інтервалу – це 1°C (Цельсія). Позначається $t^{\circ}\text{C}$.

У термодинамічній (теоретичній) шкалі температур за нуль вважається температура, при якій припиняється тепловий рух або коливання молекул, з яких складається тіло. Ця температура називається **абсолютним нулем температур**. Вимірюється в Кельвінах (К) і позначається $T\text{K}$.

Формула зв'язку термодинамічної температури ($T\text{K}$) і температури за міжнародною практичною шкалою температур ($t^{\circ}\text{C}$):

$$T\text{K} = (273,15 + t^{\circ}\text{C}). \quad (7.10)$$

За міжнародною практичною шкалою **абсолютний нуль** відповідає температурі $t = -273,15^{\circ}\text{C}$ або теоретичній шкалі $T = 0\text{K}$.

Цікаві факти!

Окрім представлених вище температурних шкал існують ще інші:

- **Шкала Фаренгейта ($t^{\circ}\text{F}$)**. Шкала названа на честь німецького вченого Габрієля Фаренгейта, який запропонував її в 1724 році. Довгий час шкала Фаренгейта була основною в англomовних країнах, але в кінці 60-х на початку 70-х років ХХ ст. вона була практично витиснена шкалою Цельсія. Рішенням Міжнародних організацій ООН, був намічений поступовий перехід на єдину шкалу Цельсія після 2010 р. Лише у США, Белізі, Багамах, Палау та Кайманових островах шкала

Фаренгейта до нашого часу широко використовується в побутових цілях.

Нуль на цій шкалі визначається за температурою замерзання суміші води, льоду та нашатирю (1:1:1), а за 100 °F взята середня температура тіла здорової людини.

- **Шкала Реомюра ($t^{\circ}R$).** Запропонована в 1730 році Р.А. Реомюром, який описав винайдений ним спиртовий термометр. Один градус цієї шкали дорівнює 1/80 різниці температур кипіння води і танення льоду (тобто градус Реомюра відповідає 5/4 градусу Цельсія). Ця шкала практично не використовується.

Порівняння температурних шкал

| Опис | Кельвін | Цельсій | Фаренгейт | Реомюр |
|---|---------|---------|-----------|---------|
| Абсолютний нуль | 0 | -273.15 | -459.67 | -218.52 |
| Температура танення суміші Фаренгейта (солі та льоду в рівних кількостях) | 255.37 | -17.78 | 0 | -14.22 |
| Температура замерзання води (за нормальних умов) | 273.15 | 0 | 32 | 0 |
| Середня температура людського тіла | 310.0 | 36.8 | 98.2 | 29.6 |
| Температура кипіння води (за нормальних умов) | 373.15 | 100 | 212 | 80 |
| Температура поверхні Сонця | 5800 | 5526 | 9980 | 4421 |

Температура всередині блискавки зазвичай близько 20000 °С. Інколи більша. Але ніколи не перевищує 30000 °С у каналі блискавки, найгарячішому місці. В області каналу – близько 2000-3000 °С, не вище. На відстані в 30 см від каналу температура невисока, близько 300 °С. При ударі блискавки пісок перетворюється на скло. Після грози можна виявити скляні смуги в піску.

7.1.3 Особливості теплового руху частинок

*Безперервний хаотичний рух частинок називається **тепловим рухом**.*

Молекулярна фізика розглядає фізичні системи, які складаються з великого числа частинок. Лише в цьому випадку можна говорити про тепловий рух.

Основними властивостями теплового руху є його масовість, безперервність і хаотичність.

Положення частинок в процесі теплового руху весь час змінюється, їх швидкості можуть бути різними як за модулем, так і за напрямом. Рух кожної частинки окремо підлягає законам механіки.

***Середній квадрат проекції швидкості** визначається за рівнянням*

$$\overline{v^2} = \frac{\vec{v}_1^2 + \vec{v}_2^2 + \vec{v}_3^2 + \dots + \vec{v}_N^2}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N \vec{v}_i^2}{N}, \quad (7.11)$$

де \vec{v} – швидкість молекул, м/с;

N – число молекул.

***Середня квадратична швидкість** молекул (\bar{v}) – це корінь квадратний з середнього квадрата швидкості*

$$\bar{v} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \vec{v}_i^2}{N}}. \quad (7.12)$$

Аналогічно вводиться поняття ***середньої кінетичної енергії*** теплового руху частинки

$$\overline{E_k} = \frac{E_{k1} + E_{k2} + E_{k3} + \dots + E_{kN}}{N} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}, \quad (7.13)$$

де m_0 – маса молекули (частинки), кг.

На основі кількісних вимірів деяких властивостей тіл і речовин встановлено, що підвищення температури спричиняє збільшення інтенсивності теплового руху. Чим більша температура тіла, тим більша

середня швидкість руху молекул, тим більша середня кінетична енергія молекул.

Середня кінетична енергія теплового руху частинок пропорційна абсолютній температурі

$$\overline{E_k} \approx T. \quad (7.14)$$

У молекулярно-кінетичній теорії **температура** – це величина, яка визначається середньою кінетичною енергією частинок, з яких складається система:

$$\overline{E_k} = \frac{i}{2} kT, \quad (7.15)$$

де $i = 3$ – для одноатомних молекул;

$i = 5$ – для двоатомних молекул;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – **стала Больцмана**.

Тоді **середню швидкість теплового руху** одноатомних молекул можна ще визначити

$$\overline{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}, \quad (7.16)$$

де $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$ – **універсальна газова стала**, яка визначається як добуток сталої Больцмана k на сталу Авогадро N_A :

$$R = kN_A. \quad (7.17)$$

Приклади **середньої швидкості теплового руху** для різних газів при 0°C : кисень – 475 м/с; азот – 493 м/с; водень – 1840 м/с.

7.1.4 Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу (рівняння Клаузіуса)

Ідеальний газ – це газ, в якому середня відстань між молекулами набагато більша від розмірів молекул, тому потенціальною енергією молекул в ньому нехтують.

Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії (МКТ) газу (рівняння Клаузіуса) зв'язує мікропараметри ($m_0, n, \overline{v^2}$) і макропараметри (p, V, T):

$$p = \frac{1}{3} m_0 n \overline{v^2}, \quad (7.18)$$

де m_0 – маса молекули, м/с;

n – концентрація молекул, м⁻³;

$\overline{v^2}$ – середній квадрат швидкості руху молекул, м/с.

Основне рівняння МКТ, що виражає залежність тиску газу (p) від концентрації молекул (n) і температури (T):

$$p = nkT. \quad (7.19)$$

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

Закон Авогадро: у рівних об'ємах газів при однакових значеннях температури тиску міститься однакове число молекул:

$$p = nkT = \frac{N}{V} kT, \quad (7.20)$$

де $n = \frac{N}{V}$ – концентрація молекул.

Контрольні питання

1. Сформулюйте основні положення молекулярно-кінетичної теорії.
2. Які факти свідчать про те, що фізичні тіла в речовині дискретні?
3. Які явища доводять, що частинки тіл і речовин знаходяться в безперервному хаотичному русі?
4. Які явища підтверджують, що між молекулами є проміжки?
5. Що свідчить про те, що між частинками існують сили молекулярної взаємодії?
6. Які сили молекулярної взаємодії залежать від відстані між молекулами?
7. Чому дорівнює середній квадрат проекції швидкості молекул?
8. Чому дорівнює середня квадратична швидкість молекул?
9. Чому дорівнює середня кінетична енергія теплового руху частинок?
10. Які фізичні явища (процеси) називають тепловими?
11. Який фізичний сенс поняття «температура»?
12. З допомогою яких приладів визначається температура?
13. Яка фізична величина визначає температуру тіла?
14. Як називається одиниця, яку застосовують для вираження температури в шкалі Цельсія? У шкалі Кельвіна?
15. Що взято за нульову точку відліку температури 0 °С?
16. Яке співвідношення між шкалою Кельвіна і Цельсія?

17. Що таке абсолютний нуль температур?
18. Як залежить температура від середньої кінетичної енергії теплового руху частінок?
19. Яке співвідношення між середньою кінетичною енергією молекули досить розрідженого газу та абсолютною температурою?
20. Чому дорівнює стала Больцмана?
21. Як визначити середню швидкість теплового руху одноатомних молекул?
22. Чому дорівнює універсальна газова стала?
23. Яка фізична величина називається тиском? Як можна виразити одиницю тиску (паскаль) через основні одиниці?
24. Як можна пояснити тиск газу на основі молекулярно-кінетичної теорії?
25. Що таке «ідеальний газ» і для чого вводиться це поняття?

7.2 Основи кінетичної теорії газів

7.2.1 Рівняння стану ідеального газу (рівняння Клапейрона-Менделєєва)

Рівняння стану ідеального газу зв'язує макроскопічні параметри p , V , T , що характеризують стан будь-якої маси газу.

Рівняння стану ідеального газу (рівняння Клапейрона-Менделєєва):

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad \text{або} \quad pV = \nu RT. \quad (7.21)$$

Рівняння стану ідеального газу для даної маси газу при переході із стану 1 в стан 2 можна записати у вигляді *об'єданого газового закону*

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad \text{або} \quad \frac{pV}{T} = \text{const} \quad (7.22)$$

$$m = \text{const}$$

7.2.2 Газові закони

Газові закони визначають кількісну залежність між двома параметрами даної маси газу при фіксованому значенні третього параметра (p , V або T).

Термодинамічні процеси, що протікають при незмінному значенні кількості речовини та стану одного фізичного параметра, називаються **ізопроцесами**.

- **Закон Бойля-Маріотта** (ізоермічний процес $T = \text{const}$, $\Delta T = 0$, $m = \text{const}$). З рівняння стану ідеального газу (7.22) видно, що при сталій температурі ($T = \text{const}$) зміна об'єму газу V спричиняє зміну тиску p :

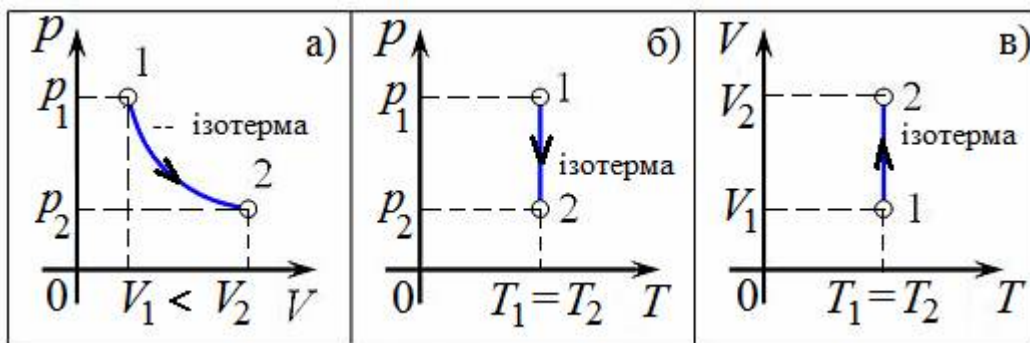
$$\begin{array}{c} \boxed{pV = \text{const}} \\ \boxed{m = \text{const}} \quad \boxed{T = \text{const}} \end{array} \quad (7.23)$$

Закон Бойля-Маріотта: для даної маси газу при сталій температурі добуток об'єму газу на тиск є сталою величиною.

Для будь-яких двох станів газу закон Бойля-Маріотта можна записати у вигляді

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \text{ або } \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}. \quad (7.24)$$

Графіки залежності між параметрами p , V і T при сталій температурі (рис. 7.2).



а) – в координатах p, V ізоерма – гіпербола
 б) – в координатах p, T ізоерма – пряма лінія, перпендикулярна осі T
 в) – в координатах V, T ізоерма – пряма лінія, перпендикулярна осі T

Рис. 7.2 – Графіки ізоермічного стиснення газу ($V_2 < V_1$)

Ізоерма – лінія на діаграмі або графіку, яка з'єднує точки з рівними значеннями температури $T = \text{const}$.

Ізоермічний процес протікає повільно, оскільки він зумовлений теплообміном з довкіллям.

- **Закон Гей-Люссака** (ізобаричний процес $p = const$, $\Delta p = 0$, $m = const$). З рівняння стану ідеального газу (7.22) видно, що при сталому тиску ($p = const$) зміна температури газу T спричиняє зміну об'єму V :

$$\boxed{\frac{V}{T} = const} \quad (7.25)$$

$m = const$

$p = const$

Закон Гей-Люссака. Об'єм даної маси газу при сталому тиску прямо пропорційний його абсолютній температурі.

Для будь-яких двох станів газу закон Гей-Люссака можна записати у вигляді

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \text{ або } \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (7.26)$$

Закон Гей-Люссака (рис. 7.3) також можна представити у вигляді

$$V = V_0(1 + \beta t), \text{ або } \frac{\Delta V}{V_0} = \beta \Delta T \quad (7.27)$$

де T – температура за міжнародною шкалою, К;

V_0 – об'єм при 0°C , м^3 ;

$\beta = \frac{1}{273} \text{К}^{-1}$ – коефіцієнт об'ємного розширення газу при сталому тиску для всіх газів.

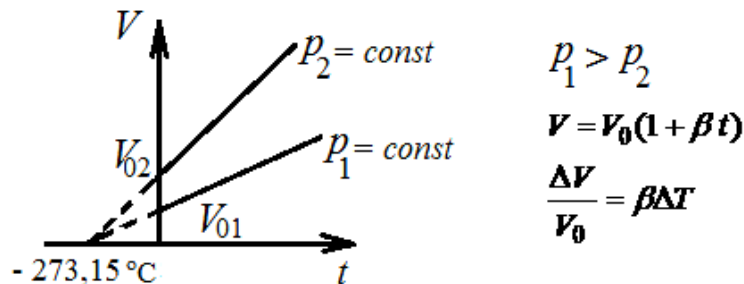
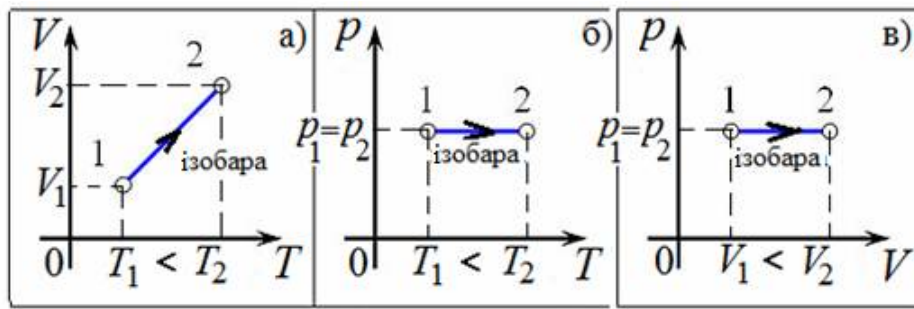


Рис. 7.3– Закон Гей-Люссака

Графіки залежності між параметрами стану p , V і T для даної маси газу $m = \text{const}$ при сталому тиску $p = \text{const}$ (рис. 7.4).



а) у координатах V, T б) у координатах p, T в) у координатах p, V
 ізобара похила ізобара – пряма лінія, перпендикулярна осі p
 пряма лінія

Рис. 7.4 – Графіки ізобаричного теплового розширення газу ($T_2 > T_1$, і $V_2 > V_1$)

Ізобара – лінія на діаграмі або графіку, що з'єднує крапки з рівними значеннями тиску $p = \text{const}$.

▪ **Закон Шарля (ізохоричний процес $V = \text{const}$, $\Delta V = 0$, $m = \text{const}$).**

З рівняння стану ідеального газу (7.22) видно, що при сталому об'ємі ($V = \text{const}$) зміна температури T газу спричиняє за собою зміну тиску p :

$$\frac{p}{T} = \text{const}$$

$$\begin{matrix} m = \text{const} & V = \text{const} \end{matrix} \quad (7.28)$$

Закон Шарля: тиск даної маси газу при сталому об'ємі прямо пропорційний його абсолютній температурі.

Для будь-яких двох станів газу закон Шарля можна записати у вигляді

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad \text{або} \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (7.29)$$

Закон Шарля (рис. 7.5) можна також представити у вигляді:

$$p = p_0(1 + \gamma t), \quad \text{або} \quad \frac{\Delta p}{p_0} = \gamma \Delta T, \quad (7.30)$$

де p – тиск газу при температурі t , гПа;
 p_0 – тиск газу при температурі 0°C , гПа;

$\gamma = \frac{1}{273} \text{K}^{-1}$ – термічний коефіцієнт тиску для всіх газів.

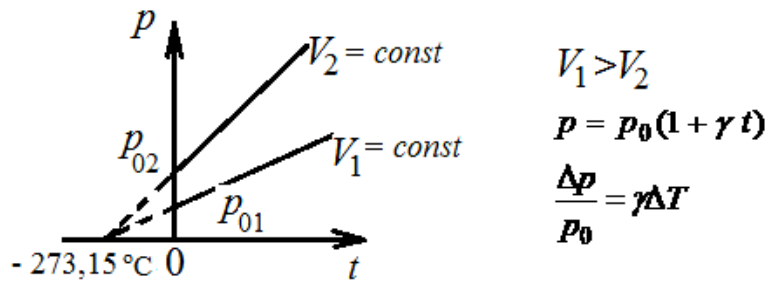
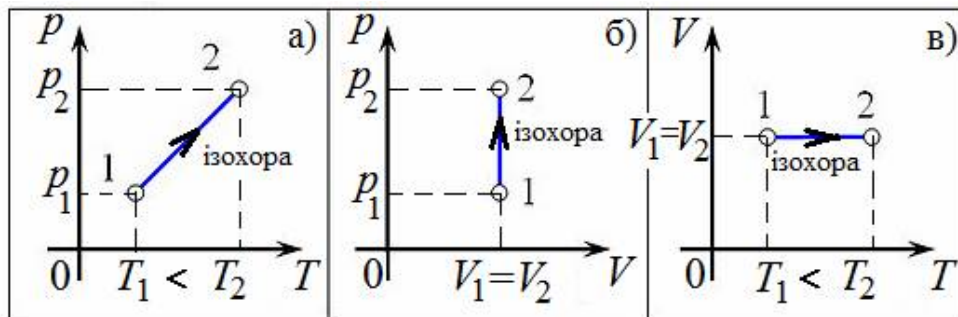


Рис. 7.5– Графіки ізохоричного нагрівання газу

Графіки залежності між параметрами стану p , V і T для даної маси газу $m = \text{const}$ при сталому об'ємі (рис. 7.6).



а) у координатах p, T б) у координатах p, V в) у координатах V, T
ізохора похила ізохора – пряма лінія, перпендикулярна осі V
пряма лінія

Рис. 7.6 – Графіки ізохоричного нагрівання газу ($T_2 > T_1$ і $p_2 > p_1$).

Ізохора – лінія на діаграмі або графіку, що з'єднує точки з рівними значеннями об'єму $V = \text{const}$.

7.2.3 Закон Дальтона

Закон Дальтона: тиск суміші газів дорівнює сумі парціальних тисків газів її складових:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n. \quad (7.31)$$

Парціальний тиск – це тиск, який створював би газ, займаючи даний об'єм одноосібно.

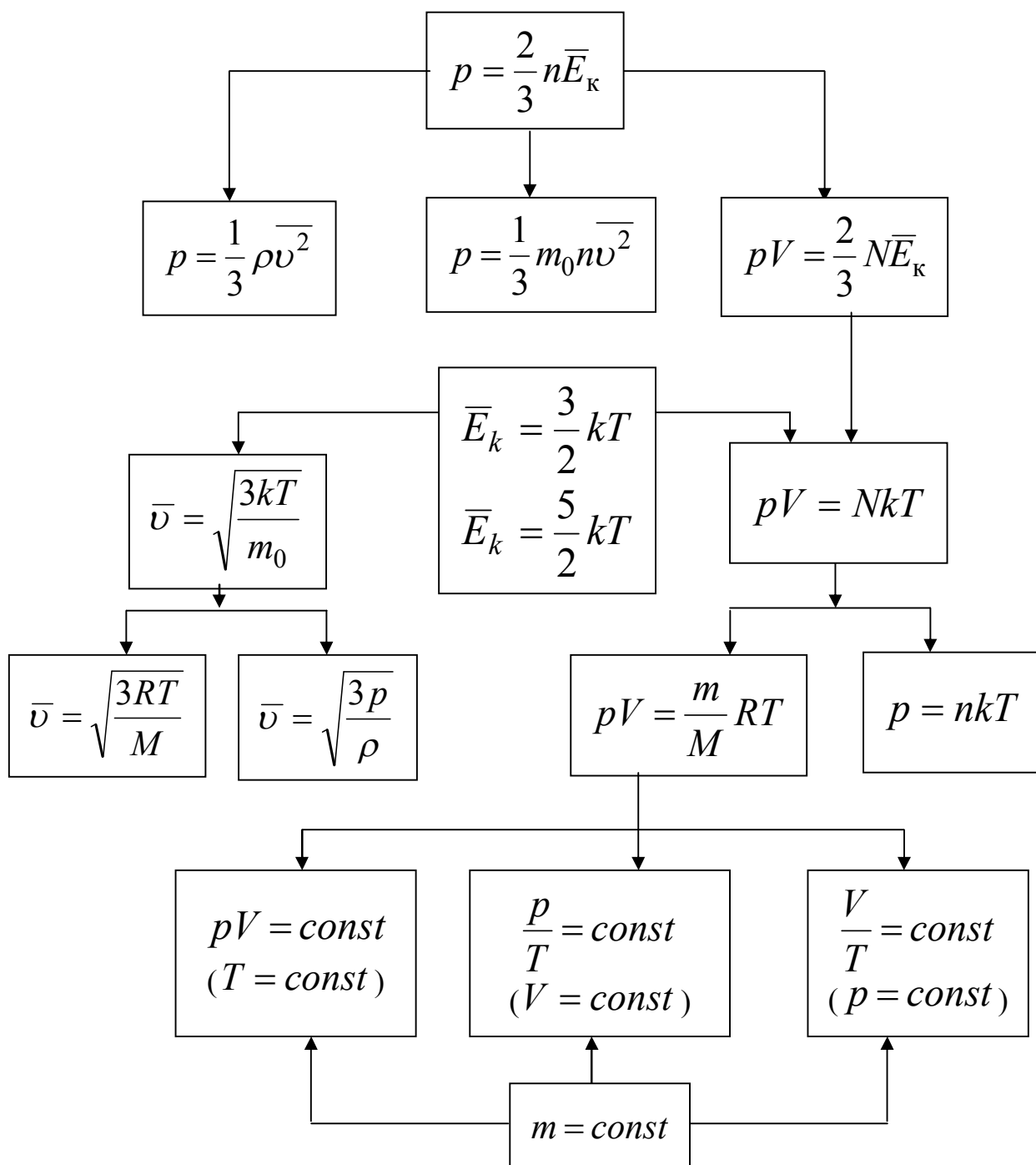


Рис. 7.7 – Молекулярно-кінетична теорія ідеального газу в формулах

Контрольні питання

1. Що таке «ідеальний газ» і для чого вводиться це поняття?
2. Які макропараметри зв'язують рівняння стану ідеального газу (рівняння Клайперона-Менделєєва). Напишіть це рівняння.
3. Напишіть формулу, що виражає об'єднаний газовий закон (рівняння Клайперона).
4. Яка фізична величина називається тиском? Як можна виразити одиницю тиску (Паскаль) через основні одиниці?
5. Як можна визначити тиск газу на основі молекулярно-кінетичної теорії?
6. Сформулюйте закон Бойля-Маріотта.
7. Сформулюйте закон Гей-Люссака.
8. Сформулюйте закон Шарля.
9. Що показує термічний коефіцієнт тиску?
10. Напишіть формули, які виражають закон Гей-Люссака, якщо температура виражається: 1) у кельвінах; 2) у градусах Цельсія.
11. Що таке парціальний тиск?
12. Сформулюйте закон Дальтона.

7.3 Основи термодинаміки

Термодинаміка – розділ фізики, який вивчає загальні властивості макроскопічних систем, що знаходяться в стані термодинамічної рівноваги. Термодинаміка вивчає найбільш загальні закономірності перетворення енергії, але не розглядає молекулярну будову речовини.

Термодинамічною системою називають тіло або сукупність тіл, в яких відбуваються процеси, пов'язані із зміною внутрішньої енергії.

Це може бути газ, рідина, тверде тіло, людський організм і так далі. Проста термодинамічна система – газ в циліндрі.

Стан термодинамічної системи визначається температурою, об'ємом, зовнішнім тиском і іншими термодинамічними параметрами.

Ізольованою (замкнутою) термодинамічною системою називають систему, в якій відсутній обмін енергією із зовнішнім середовищем.

Термодинамічною рівновагою називають такий стан системи, в якій ізольована система приходить з часом.

В стані термодинамічної рівноваги параметри системи залишаються сталими.

Термодинамічним процесом називають перехід системи з одного термодинамічного стану в інший.

7.3.1 Внутрішня енергія та її зміна при теплопередачі й здійсненні роботи

Тепловим рухом називається хаотичний рух атомів і молекул.

➤ *Внутрішня енергія (U) тіла – це сума кінетичних енергій*

($\sum_{i=1}^N E_{ki}$) теплового руху всіх частинок і потенціальних енергій

($\sum_{i=1}^N E_{pi}$) їх взаємодії:

$$U = \sum_{i=1}^N E_{ki} + \sum_{i=1}^N E_{pi}, [U] = 1 \text{ Дж}, \quad (7.32)$$

де N – число частинок.

Відомо, що температура (T) є мірою середньої кінетичної енергії теплового руху частинок. Середня потенціальна енергія взаємодії частинок залежить від об'єму (V) речовини (оскільки при зміні об'єму змінюється середня відстань між частинками). Отже, внутрішня енергія тіла залежить від температури та об'єму. Це означає, що внутрішня енергія тіл визначається макропараметрами (T, V, p), які характеризують стан тіл: $U = f(T, V)$, або $U = f(p, T)$, або $U = f(p, V)$.

Внутрішня енергія змінюється при:

- здійсненні роботи над тілом або самим тілом;
- теплопередачі.

Внутрішня енергія ідеального газу. Ідеальний газ є термодинамічною системою. Оскільки молекули ідеального газу не взаємодіють між собою, то їх потенціальну енергію можна вважати рівною

нулю $\sum_{i=1}^N E_{pi} = 0$.

Тоді внутрішня енергія ідеального газу дорівнює сумі кінетичних енергій теплового руху молекул:

$$U = E_{k1} + E_{k2} + E_{k3} + \dots + E_{kN} = \sum_{i=1}^N E_{ki}, \quad (7.33)$$

де N – число молекул.

Середня кінетична енергія молекул ідеального газу визначається рівнянням $\overline{E_k} = \frac{i}{2} kT$. Якщо газ містить N молекул, то їх загальна енергія:

$$\boxed{U = \frac{i}{2} kT N} \quad \text{або} \quad \boxed{U = \frac{i}{2} kT \frac{m}{M} N_A = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT}, \quad (7.34)$$

де m – маса газу, кг;
 M – молярна маса цього газу, кг;
 $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана;
 N_A – число Авогадро;
 $R = k \cdot N_A = 8,31$ Дж/(К моль) – універсальна газова стала.
 i – число степенів вільності;
 $i = 3$ – для одноатомних газів;
 $i = 5$ – для двоатомних газів.

Зміна внутрішньої енергії ідеального газу в термодинамічному процесі визначається лише зміною його температури не залежить від характеру цього процесу:

$$\boxed{\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{i}{2} N \cdot k(T_2 - T_1)}. \quad (7.35)$$

Робота ідеального газу. Її геометричне тлумачення.

Термодинамічна робота здійснюється тілами при зміні їх об'єму.

Оскільки тверді та рідкі тіла при нагріванні розширюються незначно, то й термодинамічна робота, яка здійснюється ними, незначна. Вони можуть здійснювати механічну роботу. Роботу в термодинаміці може здійснювати лише газ, який значно змінює свій об'єм при нагріванні (охлажденні).

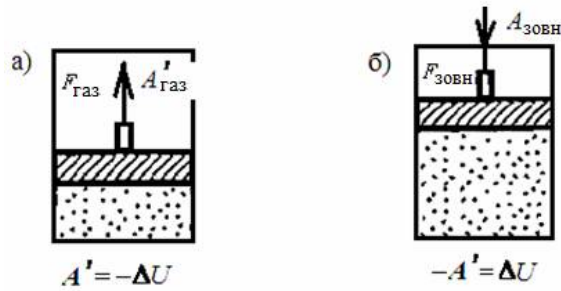
При здійсненні роботи внутрішня енергія системи може змінюватися. Уявімо циліндр з рухливим поршнем, заповнений газом під тиском p (рис. 7.8):

а) Стискуваний газ діє на поршень площею S з силою тиску $F = p \cdot S$. Вважатимемо, що при повільному переміщенні поршня на відстань Δh газ почне ізобарично розширюватися (об'єм $V_2 > V_1$).

Розширюючись, газ здійснює позитивну роботу A' (рис. 7.8, а):

$$\boxed{A' = F \cdot \Delta h = p \cdot S \cdot \Delta h = p \cdot \Delta V = p \cdot (V_2 - V_1) > 0}, \quad (7.36)$$

а його внутрішня енергія зменшується ($\Delta U < 0$), оскільки газ передає енергію зовнішнім тілам: $A' = -\Delta U$.



а – розширення газу; б – стискання газу

Рис. 7.8 Термодинамічна робота

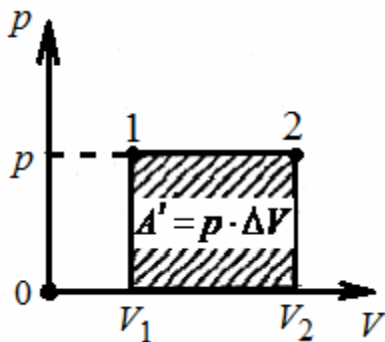


Рис.7.9

Видно (рис. 7.9), що робота газу чисельно дорівнює площі фігури під графіком.

б) Навпаки, хай зовнішні сили стискають газ (рис, 7.8, б). Тоді робота газу негативна ($A' < 0$). Здійснюючи над газом роботу ($A_{зовн} = -A'$), зовнішні сили передають газу енергію, і його внутрішня енергія збільшується ($\Delta U > 0$): $-A' = \Delta U$.

Щоб газ при ізобаричному розширенні зробив позитивну роботу, він повинен нагріватися ($T_2 > T_1$).

Це легко показати на прикладі ідеального газу з рівняння Клапейрона-Менделєєва:

$$pV = \frac{m}{M}RT, \quad (7.37)$$

$$V = \frac{m}{M} \cdot \frac{RT}{p}. \quad (7.38)$$

$$\Delta V = V_2 - V_1 = \frac{m}{M} \cdot \frac{R}{p} T_2 - \frac{m}{M} \cdot \frac{R}{p} T_1 = \frac{m}{M} \cdot \frac{R}{p} \cdot (T_2 - T_1). \quad (7.39)$$

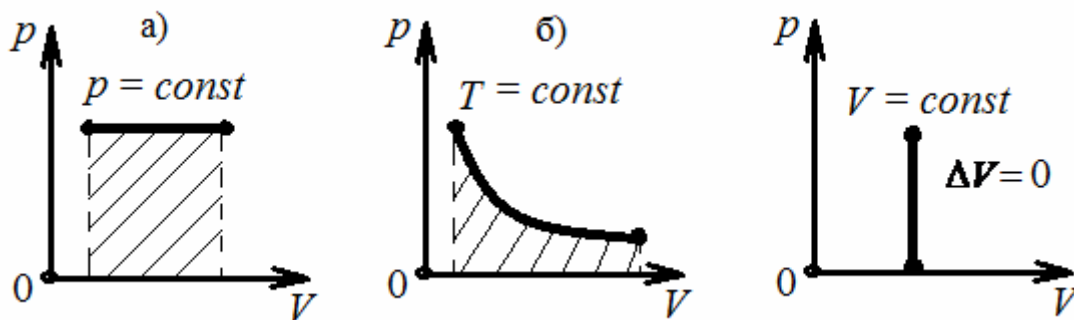
Тому роботу **ізобаричного процесу для ідеального газу** можна визначити так:

$$A' = p(V_2 - V_1) = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1). \quad (7.40)$$

Робота ідеального газу при ізотермічному процесі:

$$A' = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (7.41)$$

Геометричне тлумачення роботи газу. Робота газу чисельно дорівнює площі фігури, обмеженої графіком залежності p від V , віссю V і ординатами початкового та кінцевого стану (рис. 7.10).



а) ізобаричний процес; б) ізотермічний процес; в) ізохоричний процес

Рис. 7.10

Теплопередача та її види. Теплопередачею або теплообміном називається процес передачі енергії від одного тіла до іншого без здійснення роботи.



Існує три способи теплопередачі:

- 1) теплопровідність;
- 2) конвекція;
- 3) випромінювання.

Теплопровідність – спосіб теплопередачі, при якому передача внутрішньої енергії від одних тіл до інших відбувається при їх зіткненні та зумовлена взаємодією атомів і молекул.

Рис. 7.11

Конвекція – спосіб теплопередачі, при якому внутрішня енергія від одних тіл до інших передається рухомими струменями рідини або газу (рис. 7.11). Конвекція спричиняє виникнення хмар і вітру (бризу) на березі моря.

Випромінювання – теплообмін зумовлений передачею енергії електромагнітним потоком (інфрачервоний діапазон електромагнітних хвиль).

Кількість теплоти. Рівняння теплового балансу. Питома теплоємність речовини.

Міра зміни внутрішньої енергії в процесі теплопередачі називається **кількістю теплоти** $[Q] = \text{Дж}$.

При теплообміні не відбувається перетворення однієї форми енергії на іншу: частина внутрішньої енергії гарячого тіла передається холодному і припиняється теплообмін при вирівнюванні їх температур.

Теплообмін в замкнутій системі описується **рівнянням теплового балансу**:

$$\boxed{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = 0, \quad \sum Q_{\text{отр}} = \sum Q_{\text{від}}} \quad (7.42)$$

де $\sum Q_{\text{отр}}$ – сумарна кількість теплоти, отримана тілом при теплообміні, Дж;

$\sum Q_{\text{від}}$ – сумарна кількість теплоти, віддана тілом при теплообміні, Дж.

Формули кількості теплоти для процесів нагрівання та охолодження:

$$\boxed{Q = c \cdot m \cdot \Delta T, \quad Q = C \cdot \Delta T}, \quad \text{або} \quad (7.43)$$
$$\boxed{Q = c \cdot m \cdot \Delta t, \quad Q = C \cdot \Delta t},$$

де T – температура за термодинамічною шкалою, К;

t – температура за шкалою Цельсія ($T \text{ К} = t^\circ\text{C} + 273^\circ\text{C}$; $\Delta T \text{ К} = \Delta t^\circ\text{C}$);

c – **питома теплоємність речовини**, тобто кількість теплоти, необхідна для нагрівання одиниці маси речовини на 1 К або на 1°C :

$$c = \frac{Q}{m \Delta T}, [c] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad (7.44)$$

$C = cm$ – **теплоємність тіла**, тобто кількість теплоти, необхідна для нагрівання тіла масою m на 1 К або на 1°C :

$$C = \frac{Q}{\Delta t}, [C] = \frac{\text{Дж}}{\text{К}}. \quad (7.45)$$

Кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання тіла та виділяється при його охолодженні, розраховується за формулами:

для нагрівання ($t_2 > t_1$):

$$Q = c \cdot m \cdot (t_2 - t_1); \quad Q = C \cdot (t_2 - t_1); \quad (7.46)$$

для охолодження ($t_2 < t_1$):

$$Q = c \cdot m \cdot (t_1 - t_2); \quad Q = C \cdot (t_1 - t_2). \quad (7.47)$$

Рідкі речовини розширюються при нагріванні трохи, їх питома теплоємність при сталому тиску залишаються незмінними й визначаються за допомогою таблиць.

Якщо нагрівати газ при сталому об'ємі, його молярну теплоємність (C_V) і питому теплоємність (c_V) можна розрахувати за формулами:

$$C_V = \frac{iR}{2}, \quad (7.48)$$

$$c_V = \frac{C_V}{M} = \frac{iR}{2M} \quad (7.49)$$

де M – молярна маса речовини, кг.

Якщо нагрівати газ при сталому тиску, його молярну теплоємність (C_p) і питому теплоємність (c_p) можна розрахувати за формулами:

$$C_p = C_V + R = \frac{(i+2)}{2} R, \quad (7.50)$$

$$c_p = \frac{(i+2)R}{2M}. \quad (7.51)$$

Для одноатомного газу $i = 3$, двоатомного $i = 5$, три- і більше атомних газів $i = 6$.

Молярна теплоємність речовини (C) – кількість теплоти, необхідна для нагрівання 1 моля речовини на 1 К.

$$[C] = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}. \quad (7.52)$$

Цікаві факти!

$$c_{\text{води}} = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \quad c_{\text{льод}} = 2100 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \quad c_{\text{свинця}} = 140 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$
$$c_{\text{повітря}} = 1000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \text{ при } p = \text{const.}$$

Питома теплота горіння палива. ККД нагрівача.

Питома теплотагоріння(q) – кількість тепла, яка виділяється при повному згоранні 1 кг палива:

$$q = \frac{Q}{m}, [q] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}. \quad (7.53)$$

Пристрої, в яких відбувається горіння палива, називаються **нагрівачами**. Це печі, топки та пальники різної конструкції або камери горіння в теплових машинах.

Завжди при згоранні палива в системі виділяється більше теплоти (Q), ніж використовується в корисних цілях (Q_k), оскільки є втрати теплоти (ΔQ):

$$Q > Q_k, \quad Q = Q_k + \Delta Q. \quad (7.54)$$

Відношення кількості корисної теплоти Q_k до кількості теплоти Q , виділеної при повному згоранні палива, називається **коефіцієнтом корисної дії (ККД) нагрівача**:

$$\eta = \frac{Q_k}{Q} \text{ або } \eta = \frac{Q_k}{Q} \cdot 100\%. \quad (7.55)$$

Видно, що завжди:

$$\eta = \frac{Q_k}{Q} = \frac{Q - \Delta Q}{Q} = 1 - \frac{\Delta Q}{Q} < 1, \quad (7.56)$$

оскільки втрати енергії $\Delta Q \neq 0$.

Цікаві факти!

$$q_{\text{бензину}} = 46 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}; \quad q_{\text{дерева}} = 10 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}};$$
$$q_{\text{дизельного палива}} = 42 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}; \quad q_{\text{пороху}} = 3 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

7.3.2 Перший закон термодинаміки. Адіабатичний процес

Закон збереження та перетворення енергії, поширений на теплові явища, називається першим законом термодинаміки.

Перший закон термодинаміки: зміна внутрішньої енергії ΔU системи при переході з одного стану в інший дорівнює сумі роботи зовнішніх сил A і кількості теплоти Q переданої системі:

$$\boxed{\Delta U = Q + A}. \quad (7.57)$$

Для системи, яка сама здійснює роботу A' над зовнішніми тілами:

Перший закон термодинаміки: кількість теплоти Q , яка надається системі, йде на зміну її внутрішньої енергії ΔU і на здійснення системою роботи над зовнішніми тілами A' :

$$\boxed{Q = \Delta U + A'}. \quad (7.58)$$

Адіабатичний процес – процес в теплоізованій системі (рис. 7.12, а):

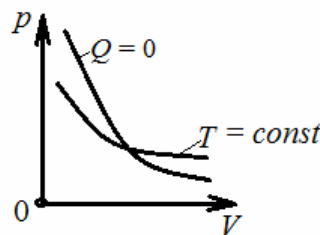
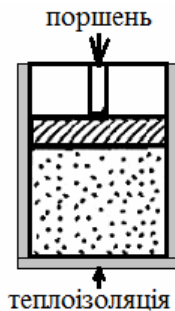
$$Q = 0. \quad (7.59)$$

Рівняння Пуассона для адіабатичного процесу в ідеальному газі:

$$pV^\nu = \text{const}, \quad (7.60)$$

де ν – відношення молярних (або питомих) теплоемностей газу при сталому тиску та об'ємі:

$$\nu = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i + 2}{i}. \quad (7.61)$$



а) теплоізована система $Q = 0$ б) діаграма адіабатичного процесу

Рис. 7.12

Адіабата ($pV^\nu = \text{const}$) розташовується крутіше, ніж ізотерма ($T = \text{const}$, $pV = \text{const}$) (рис. 7.12, б). Це пояснюється тим, що при адіабатичному стисканні збільшення тиску газу зумовлене не лише зменшенням його об'єму, як при ізотермічному стисканні, але і підвищенням температури. При адіабатичному розширенні температура знижується ($\Delta U = -A'$), при стисканні – підвищується ($\Delta U = A$).

Оскільки ідеальної теплоізоляційної оболонки не існує, адіабатичний процес в природі може бути таким, що лише швидко протікає: $Q \rightarrow 0$ (теплопередача – процес дуже повільний).

Таблиця 7.1 – Вживання першого закону термодинаміки до різних ізопроеців в газі

| Ізотермічний $T = \text{const}$, $m = \text{const}$ | Ізохоричний $V = \text{const}$, $m = \text{const}$ | Ізобаричний $p = \text{const}$, $m = \text{const}$ | Адiabатичний $Q = 0$ |
|--|---|---|-------------------------|
| $\Delta T = 0$ | $\Delta V = 0$ | $\Delta p = 0$ | $Q = 0$ |
| $\Delta U = 0$ | $A' = 0$ | $Q = \Delta U + A'$ | $\Delta U + A' = 0$ |
| $Q = A'$ | $Q = \Delta U$ | | $\Delta U = -A'$ |
| | | | $\Delta U = A$ |

7.3.3 Другий закон термодинаміки

Другий закон термодинаміки:

- Неможливо здійснити такий періодичний процес, єдиним наслідком якого було б повне перетворення теплоти на роботу, яка отримується від нагрівача (формулювання Кельвіна).
- Неможливий процес, єдиним результатом якого є передача енергії у формі теплоти від менш нагрітого тіла до більш нагрітого (формулювання Клаузіуса).
- Вічний двигун другого роду неможливий, тобто двигун, ККД якого дорівнює 100 % перетворення теплоти на роботу (формулювання Карно).
- У тепловому двигуні, який циклічно діє, неможливо перетворити всю кількість теплоти, отриману від нагрівача, на механічну роботу.

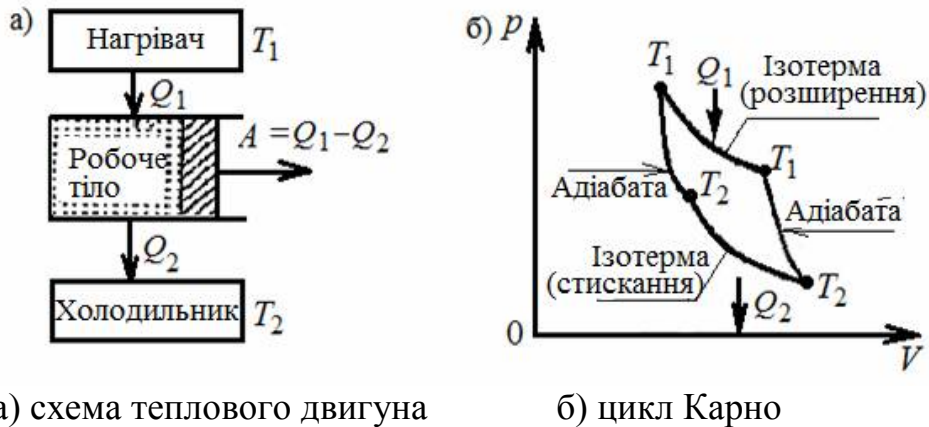


Рис. 7.13 Тепловий двигун

Тепловий двигун – машина, що перетворює внутрішню енергію палива на механічну. Тепловий двигун повинен працювати циклічно, після розширення газу іде стискання.

Три основні частини теплового двигуна (рис. 7.13, а):

- 1) нагрівач (T_1) – джерело внутрішньої енергії;
- 2) робоче тіло (газ або пара), яке виробляє механічну роботу за рахунок внутрішньої енергії, отриманої від нагрівача;
- 3) холодильник ($T_2 < T_1$), який зумовлює природний процес передачі тепла від більш нагрітого тіла до холодного, чим забезпечує компенсацію процесу перетворення теплової енергії на механічну. Холодильником може бути доквілля (двигун внутрішнього згорання).

Цикл Карно – схема ідеальної теплової машини (з найбільшим ККД) (рис. 7.13, б).

Здійснювана газом робота повністю відбувається за рахунок кількості теплоти, відданої нагрівачем. При стисканні газу робота зовнішніх сил повністю перетворюється на теплоту, що віддається холодильнику.

Термодинамічний (термічний) ККД теплового двигуна:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}, \quad (7.62)$$

де $Q_1 - Q_2 = A_{\text{робочого тіла}}$.

Теорема Карно: термічний ККД циклу Карно не залежить від природи робочого тіла і є лише функцією температур нагрівача (T_1) і холодильника (T_2):

$$\eta_i = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (7.63)$$

ККД реальної теплової машин менший ніж ККД ідеальної машини η_1 . У реальній тепловій машині завжди мають місце втрати тепла на нагрівання, на механічну роботу в механізмі машини, тому корисна робота меншавід роботи робочого тіла:

$$A_k < Q_1 - Q_2. \quad (7.64)$$

Економічний ККД теплової машини – це відношення корисної роботи двигуна ($A_k = Nt$) до кількості теплоти, виділеної при згоранні палива ($Q = qt$):

$$\eta_{ек} = \frac{A_k}{qt}. \quad (7.65)$$

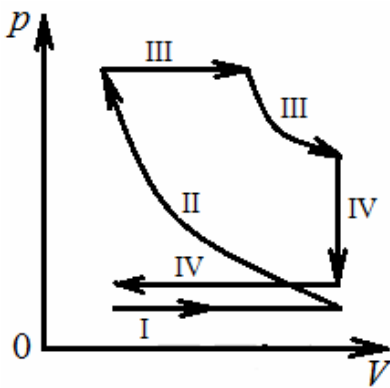


Рис. 7.14

Види теплових машин:

1. Парова та газова турбіни.
2. Парові машини.
3. Поршневі двигуни внутрішнього згорання:
 - а) карбюраторні (бензинові),
 - б) дизельні.
4. Безпоршневі двигуни внутрішнього згорання (реактивні двигуни).

ККД сучасних дизелів досягає 40%. У дизельному двигуні стискається повітря, що допускає велику міру стискання (II такт). Через форсунку впорскується пальне, займається та згорає, а потім гази згорання розширюються (III такт), відбувається вихлоп (IV такт) і всмоктування (I такт) (рис. 7.14).

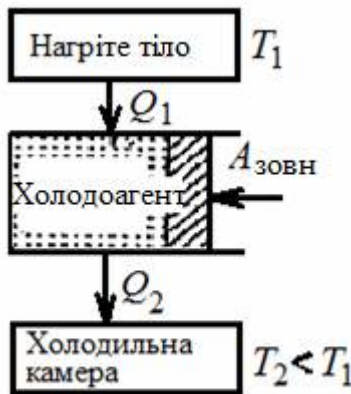


Рис. 7.15

Холодильний пристрій – машина, що підтримує в холодильній камері температуру, нижчу, ніж зовні.

Розрізняють прилади абсорбційні та парокомпресійні. У холодильних машинах абсорбції ефект охолодження утворюється в результаті фізико-хімічного процесу (ендотермічної хімічної реакції). У парокомпресійній холодильній машині здійснюється перехід теплоти від холоднішого тіла до менш холодного завдяки компенсуючому процесу перетворення механічної енергії на внутрішню енергію нагрівача. Робоче тіло при стисканні передає деяку кількість теплоти $Q_1 = A_{стиск}$ в довкілля, а при розширенні забирає з холодильної камери тепло $Q_2 = A_{розш}$ (Рис. 7.15):

$$A_{\text{стиск}} > A_{\text{розш}}, \quad (7.66)$$

$$A_{\text{зовн}} = A_{\text{стиск}} - A_{\text{розш}}.$$

Холодильний коефіцієнт:

$$k = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}. \quad (7.67)$$

Задача. У нагрівачі парової турбіни витрачається 0,35 кг дизельного палива на **кожен 1 кВт/год** корисної енергії. Температура пари 25 °С, що надходить в турбіну, температура охолоджувача – 30 °С. Обчислити фактичний ККД турбіни та порівняти його ККД з ідеальною тепловою машиною, що працює при тих же температурах.

Дано:

$$m_{\text{т}} = 0,35 \text{ кг}$$

$$q = 4,2 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$$

$$Q_{\text{н}} = 1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

$$T_1 = 273 + 250 = 523 \text{ К}$$

$$T_2 = 273 + 30 = 303 \text{ К}$$

$$\eta - ?$$

$$\eta_{\text{к}} - ?$$

Розв'язання

При повному згоранні палива теплова енергія (повна енергія): $Q = q \cdot m_{\text{п}}$. Оскільки

відбуваються втрати енергії, то лише частина цієї енергії $Q_{\text{к}} \cdot \eta$ перетворюється на корисну енергію $Q_{\text{н}}$ ∴

$$Q_{\text{н}} = Q_{\text{к}} \cdot \eta.$$

Звідки фактичне значення ККД турбіни:

$$\eta = \frac{Q_{\text{н}}}{Q} = \frac{Q_{\text{н}}}{q \cdot m_{\text{п}}}.$$

ККД ідеальної теплової машини $\eta_{\text{к}}$

визначаємо через абсолютні температури нагрівача T_1 і охолоджувача T_2 , тоді $\eta_{\text{к}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$.

Обчислення:

$$\eta_{\text{к}} = 1 - \frac{303}{523} = 1 - 0,58 = 0,42, (42\%).$$

Відповідь: $\eta = 24,5\%$, $\eta_{\text{к}} = 42\%$.

Контрольні запитання

1. Що вивчає термодинаміка?
2. Що таке термодинамічна система?
3. Яку термодинамічну систему називають ізольованою (замкнутою)?
4. Що таке термодинамічна рівновага?
5. Що таке термодинамічний процес?
6. Що таке внутрішня енергія тіла?
7. Чому дорівнює внутрішня енергія ідеального газу?
8. Чим визначається зміна внутрішньої енергії ідеального газу?
9. Які існують способи зміни внутрішньої енергії тіла?
10. У яких процесах змінюється кінетична енергія молекул тіла?
11. У яких процесах змінюється потенціальна енергія молекул тіла?
12. Чому дорівнює робота газу при його ізобаричному розширенні?
13. Коли робота газу позитивна? Коли негативна?
14. Як змінюється внутрішня енергія газу при його розширенні? стисканні?
15. Що таке кількість теплоти?
16. Коли відбувається теплопередача?
17. Які ви знаєте види теплопередачі?
18. Коли настає теплова рівновага?
19. Від чого залежить кількість теплоти, якою система обмінюється із зовнішніми тілами?
20. Від чого залежить теплоємність тіла? Що визначає питома теплоємність?
21. Що називають рівнянням теплового балансу? У чому фізичний сенс теплового балансу?
22. Чи може все тепло, що виділяється при згоранні палива, використовуватися для корисного нагрівання? Чому?
23. Чому ККД нагрівача не може дорівнювати одиниці (або 100%)?
24. Що таке адіабатичний процес?
25. Сформулюйте закон збереження перетворення енергії (Перший закон термодинаміки).
26. Сформулюйте другий закон термодинаміки.
27. Чому тепловий двигун не може працювати без охолоджувача?
28. Чому на корисну роботу не може бути перетворена вся отримана газом кількість теплоти?
29. Від чого залежить ККД теплового двигуна?
30. Чому дорівнює корисна робота ідеального теплового двигуна?
31. Що таке коефіцієнт корисної дії (ККД) теплового двигуна?
32. Напишіть формулу для обчислення термічного ККД теплового двигуна (цикл Карно)?
33. Чому ККД ідеального теплового двигуна менший від одиниці?

8. АГРЕГАТНІ СТАНИ РЕЧОВИНИ. ВЛАСТИВОСТІ РЕЧОВИНИ В РІЗНИХ АГРЕГАТНИХ СТАНАХ

8.1 Агрегатні стани речовини

Кожна речовина в природі може знаходитися в чотирьох агрегатних станах: твердому, рідкому, газоподібному та плазмовому.

Тверді речовини можуть бути двох видів: кристалічні та аморфні.

У різних станах речовина має різну будову й різний характер руху молекул (частинок).

Молекули (атоми або іони) **твердих тіл** знаходяться в близькому контакті один з одним, тому між ними існують значні сили взаємодії, завдяки яким вони не можуть вільно переміщатися. Тверді тіла зберігають форму та об'єм.

У твердих тілах частинки здійснюють коливальний рух біля положень рівноваги.

Молекули **рідини** знаходяться майже впритул одна до одної. Ось чому рідину важко стискувати (вона зберігає об'єм але змінює форму) і рідина передає однаковий тиск в будь-якому напрямі (закон Паскаля). Молекули рідини не так сильно зв'язані між собою, як молекули твердого тіла. Ось чому рідина тече і набуває форми судини, в якій вона знаходиться.

У рідинах частинки здійснюють хаотичний коливальний рух біля положень рівноваги і прямолінійне переміщення в нові положення рівноваги.

У **газах** середня відстань між молекулами (атомами) чимала в порівнянні з розмірами молекул. Сили молекулярної взаємодії на таких відстанях практично не діють. Ось чому гази легко стискаються та розширюються і не зберігають формий об'єму.

У газах частинки рухаються прямолінійно та хаотично до зіткнення з іншими частинками або із стінками посудини.

Плазмовий стан, або **плазма**, є іонізований газ, що складається з електронів та іонів. Високотемпературна плазма в природі міститься в надрах Сонця і гарячих зірок.

8.2 Теплове розширення твердих і рідких тіл

Графік залежності потенціальної енергії взаємодії простих молекул від відстані між ними.

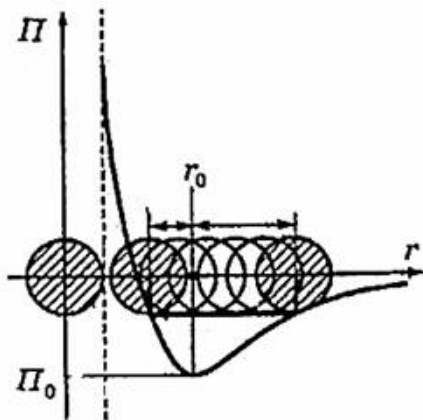


Рис. 8.1

У рідинах і твердих тілах при підвищенні температури збільшується амплітуда коливального руху молекул біля положення, яке відповідає мінімуму потенціальної енергії взаємодії між ними (дну потенціальної ями). Оскільки потенціальна крива несиметрична, перехід молекул на вищий енергетичний рівень спричиняє не лише зростання амплітуди, але й збільшення середньої відстані між молекулами: відбувається зсув центру коливань молекули. Тому рідини й тверді тіла

розширюються при підвищенні їх температур (рис. 8.1).

Лінійне та об'ємне розширення твердих і рідких тіл.

– Лінійне розширення:

де l_0 – довжина тіла при температурі $0\text{ }^{\circ}\text{C}$;

l – довжина тіла при температурі $t\text{ }^{\circ}\text{C}$;

α – коефіцієнт лінійного розширення, $[\alpha] = \text{K}^{-1}$.

$$\alpha_{\text{води}} \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}; \quad \alpha_{\text{еффір}} \approx 16 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}.$$

– Об'ємне розширення:

$$V = V_0(1 + \beta t), \quad (8.2)$$

де V_0 – об'єм тіла при температурі $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, м^3 ;

V – об'єм тіла при температурі $t\text{ }^{\circ}\text{C}$, м^3 ;

β – коефіцієнт об'ємного розширення.

Зв'язок між коефіцієнтами об'ємного та лінійного розширення для твердих тіл:

$$\beta_{\text{т.т.}} \approx 3\alpha. \quad (8.3)$$

Особливості теплового розширення води. Вода при нагріванні від 0 до 4°C зменшується в об'ємі. Густина води максимальна при 4°C . Подальше нагрівання води приводить до збільшення об'єму й зменшення густини.

Іншою особливістю води є зменшення її густини при замерзанні, внаслідок чого лід плаває на поверхні води. Ці особливості пов'язані з тим, що в твердому стані кристалічна структура менш щільна, ніж в рідкому.

Особливість теплового розширення води має важливе значення для збереження життєдіяльності живих організмів у водоймищах взимку. Охолоджені повітрям верхні шари води опускаються вниз, а теплі піднімаються вгору. Таке перемішування води відбувається до тих пір, поки температура води не знизиться до 4°C. При подальшому охолодженні верхні шари не опускаються, а при 0 °C зверху утворюється лід, плаваючи на поверхні він оберігає водоймище від повного промерзання.

8.3 Фазові переходи

*Зміна агрегатного стану речовини називається **фазовим переходом**.*

Всі фазові переходи – це термодинамічні процеси. Таких фазових переходів шість (рис. 8.2):

- 1) перехід речовини з твердого стану в рідкий – плавлення;
- 2) перехід речовини з рідкого стану в твердий – твердіння (очевидно, що твердіння – це процес, зворотний плавленню);
- 3) перехід речовини з рідкого стану в газоподібний – пароутворення;
- 4) перехід речовини з газоподібного стану в рідкий – конденсація (процес, зворотний пароутворенню);
- 5) перехід речовини з твердого стану в газоподібний – сублімація;
- 6) перехід речовини з газоподібного стану в твердий – кристалізація (процес, зворотний сублімації).

Під час фазового переходу змінюється об'єм тіла (теплове розширення) і його внутрішня енергія, оскільки при цьому змінюється розташування молекул і відстань між ними, а отже, і їх потенціальна енергія взаємодії. Найменший запас потенціальної енергії мають молекули твердого тіла, оскільки відстань між молекулами мінімальна.

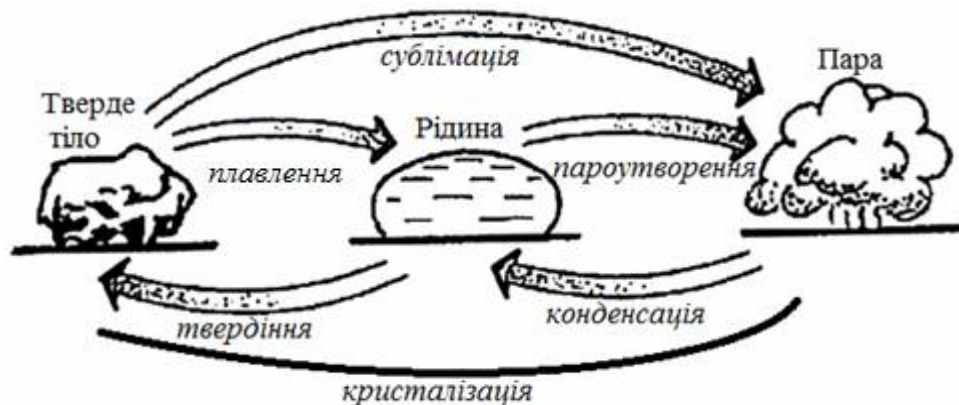


Рис. 8.2 – Фазові переходи

Фазові переходи відбуваються лише за певних умов, тобто при певних значеннях тиску p і температури T . Залежності визначаються експериментально.

Під час фазового переходу середня кінетична енергія молекул не змінюється, тому температура речовини залишається сталою (при певному тиску):

Теплота фазових переходів. Прямі процеси відбуваються при наданні теплоти ($Q > 0$), зворотні процеси – при відведенні теплоти ($Q < 0$).

*Кількість теплоти, яка витрачається на перетворення певної маси m речовини з однієї фази на іншу, називається **теплотою фазового переходу**:*

$$Q_{\text{фаз}} = q_{\text{фаз}} \cdot m, \quad (8.4)$$

де $q_{\text{фаз}}$ – питома теплота фазового переходу, яка залежить від природи речовини та визначається експериментально (її значення надані в довідниках):

$$q_{\text{фаз}} = \frac{Q_{\text{фаз}}}{m}, \quad [q_{\text{фаз}}] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}. \quad (8.5)$$

➤ **Для плавлення (і твердіння):**

$q_{\text{фаз}} = \lambda$ – питома теплота плавлення;

$Q_{\text{пл}} = \lambda \cdot m$ – при температурі плавлення (для кристалічних тіл), Дж.

➤ **Для пароутворення (і конденсації):**

$q_{\text{фаз}} = L$ – питома теплота пароутворення;

$Q_{\text{пар}} = L \cdot m$ – при температурі пароутворення, Дж.

Відзначимо:

- 1) аморфні тіла (смола, скло та ін.) не мають певної температури плавлення і твердіння. Це пов'язано з тим, що в твердому стані частинки аморфних тіл розташовані неупорядковано. Тому при плавленні немає різкого переходу від впорядкованого розташування атомів до неупорядкованого, як це спостерігається при плавленні кристалічних тіл;
- 2) перехід з рідкої фази в газоподібну може відбуватися різними процесами:

Випаровування – це пароутворення, яке відбувається лише з вільної поверхні рідини (за будь-якої температури).

Кипіння – це пароутворення, яке відбувається в об'ємі всієї рідини (при сталій температурі $T_{\text{кип}}$).

Складові теплового балансу при фазових переходах. Вигляд рівняння теплового балансу залежить від конкретного вигляду теплообміну. Розглянемо приклад перетворення певної маси m твердої речовини на газоподібний стан. У всіх фазових переходах відбувається теплообмін між нагрівачем і системою. Тому в загальному вигляді сумарна кількість теплоти $\sum Q$ витрачається на нагрівання системи і на фазові переходи:

$$\sum Q = \underbrace{c_1 \cdot m \cdot \Delta T}_{\text{нагрів}} + \underbrace{\lambda \cdot m}_{\text{фазове перетв.}} + \underbrace{c_2 \cdot m \cdot \Delta T_2}_{\text{нагрів}} + \underbrace{L \cdot m}_{\text{фазове перетв.}} + \underbrace{c_3 \cdot m \cdot \Delta T_3}_{\text{нагрів}} \quad (8.6)$$

(твердого тіла) (плавлення) (рідини) (кипіння) (пари, газу)

При цьому маса речовини при нагріванні і при фазових переходах не змінюється:

$$m_{\text{тверд}} = m_{\text{рідк}} = m_{\text{пар}} = m. \quad (8.7)$$

Всі ці процеси добре ілюструються на рис. 8.3.

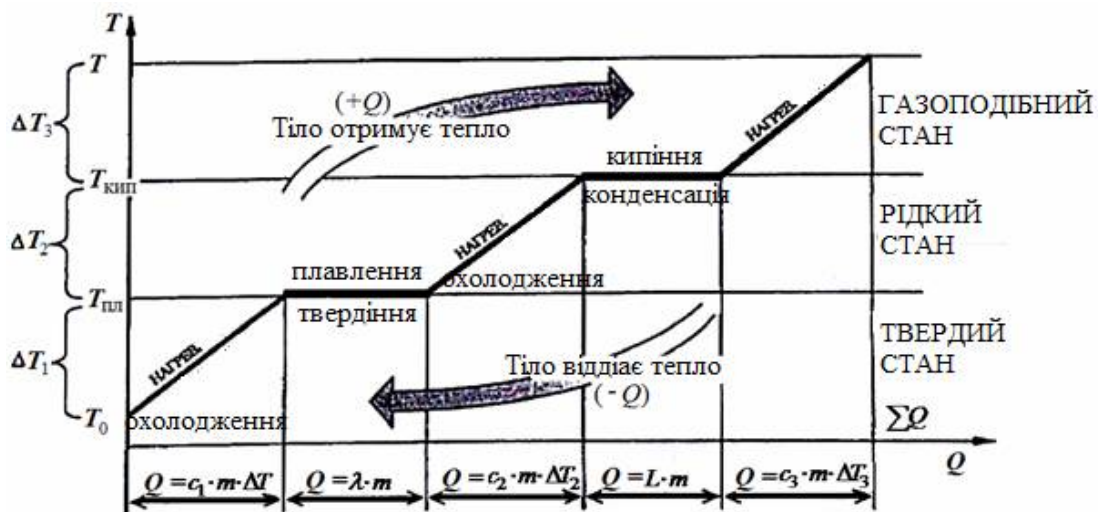


Рис. 8.3 – Тепло фазових переходів

8.4 Властивості твердих тіл

1. Зберігають форму.
2. Зберігають об'єм.

Характер молекулярного руху – коливання атомів або молекул біля положення рівноваги.

Кристалічні та аморфні тіла. Їх властивості. Розрізняють кристалічні та аморфні тверді тіла.

В аморфних тілах зберігається ближній порядок в розташуванні атомів, але відсутній далекий. Їх властивості:

1. Вони не мають температури плавлення, оскільки немає кристалічних ґрат. При нагріванні вони розм'якшуються.
2. Вони ізотропні: їх фізичні властивості однакові за всіма напрямками.

Кристали – це тверді тіла, атоми та молекули яких займають певне, впорядковане положення в просторі. Наслідком впорядкованого розташування атомів в кристалі є геометрична правильність його внутрішньої будови.

Властивості кристалів:

1. Анізотропія фізичних властивостей (їх залежність від вибраного в кристалі напрямку).
2. Наявність температури плавлення. Кристалічне тіло, досягаючи температури плавлення, починає плавитися. Вся енергія, що надається, витрачається на збільшення потенціальної енергії взаємодії молекул при руйнуванні кристалічних ґрат, а кінетична енергія молекул стабільна, тому температура тіла при плавленні не змінюється.
3. Властивості кристала визначаються не лише тим, з яких атомів він складається, але і виглядом кристалічних ґрат. Наприклад, з однакових атомів вуглецю складаються алмаз і графіт, але фізичні властивості в них різні.

Механічні властивості твердих тіл. Матеріали, що виявляють пружні властивості при значній деформації, називають **пружними**. При малих деформаціях напруга σ прямо пропорційна відносному подовженню ε . Виконується закон Гука:

$$\sigma = |\varepsilon| E. \quad (8.8)$$

Пружна деформація. Максимальну напругу, при якій ще не виникає помітної залишкової деформації, називають **граничною пружністю** $\sigma_{гр}$.

Досягши максимального значення механічної напруги $\sigma_{м.м.}$ (межі міцності) зразок розтягується без збільшення зовнішнього навантаження аж до процесу руйнування.

Запас міцності (n) дорівнює відношенню межі міцності $\sigma_{м.м.}$ до механічної напруги, що допускається $\sigma_{доп}$:

$$n = \frac{\sigma_{м.м.}}{\sigma_{доп}} \quad (8.9)$$

Матеріали, в яких незначні навантаження спричиняють пластичну деформацію, називають пластичними.

Подовження відбувається практично без збільшення навантаження.

Цікаві факти!

Межаміцності при деформації: алюміній – 100 МПа; мідь – 400 МПа; срібло – 16 МПа; золото – 140 МПа; сталь – 500 МПа.

Допустима механічна напруга: алюміній – 30-80 МПа; мідь – 30-120 МПа; сталь – 100-400 МПа.

8.5 Властивості рідин

Рідини зберігають об'єм, але не зберігають форму ($E_k \approx E_n$): .

Основна властивість рідини – *текучість*.

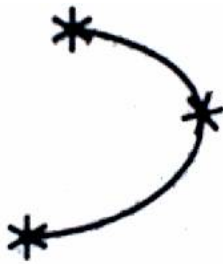


Рис. 8.4

Характер молекулярного руху: молекули коливаються відносно положення рівноваги й «перестрибують» в інші позиції (рис. 8.4). Час «осілого» життя більший від часу перескоків. Молекули розташовані на порівняно близьких відстанях, тому властивості рідини визначаються силами взаємодії молекул.

Під дією сил поверхневого натягу рідина в стані невагомості або в малих кількостях (крапля) набуває форми кулі, оскільки при цьому мінімальна площа вільної поверхні, а отже, поверхневої енергії. Всі системи прагнуть до стану з мінімальною потенціальною енергією.

Особливості поверхневого шару рідини. Найбільш характерною властивістю рідкого стану є наявність різкої межі, яка розділяє рідину і пару.

Молекули рідини, що знаходяться на її поверхні, притягуються молекулами, що знаходяться всередині рідини.

На поверхні залишається така кількість молекул, при якій її площа виявляється мінімальною для даного об'єму рідини.

Сила поверхневого натягу – це сила, що діє на межі зіткнення з твердим тілом перпендикулярно до межі по дотичній до поверхні рідини (рис. 8.5).

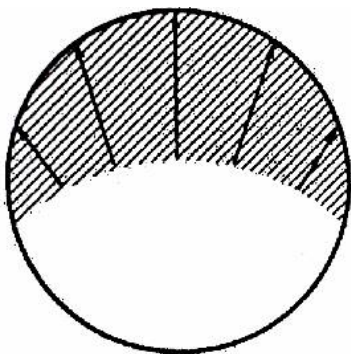


Рис. 8.5

Поверхнева енергія. Поверхневий натяг (σ) – величина, що визначається відношенням модуля сили поверхневого натягу F_H до довжини доторкання з твердим тілом l :

$$\sigma = \frac{F_H}{l}, \quad [\sigma] = \text{Н/м} \quad (8.10)$$

Величина поверхневого натягу залежить від роду рідини і температури.

Енергія поверхневого шару Π рідини площею S :

$$\Pi = \sigma \cdot S. \quad (8.11)$$

Робота при зміні площі **поверхневого шару плівки**

$$A = \sigma \Delta S = \Delta \Pi. \quad (8.12)$$

Величину поверхневого натягу можна визначити методом відриву крапель:

$$\sigma = \frac{m_k g}{l}, \quad (8.13)$$

де l – довжина межі поверхневого шару, м;
 m_k – маса краплі, кг;
 g – прискорення вільного падіння, м/с².

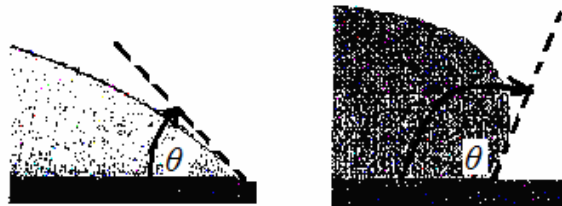
Цікаві факти!

Поверхневий натяг при температурі 20 °С: води – $7,2 \cdot 10^{-2}$ Н/м; ртуті – $47 \cdot 10^{-2}$ Н/м; мильного розчину – $\approx 4 \cdot 10^{-2}$ Н/м.

Поверхневий натяг крові людини при $t = 36,7$ °С – $60 \cdot 10^{-2}$ Н/м.

Явище змочування. Капілярні явища. Рідина, яка розтікається по твердому тілу, називається **змочувальною** (вода по склу та ін.). При цьому рівнодіюча сил притягання молекул на межі зіткнення з молекулами рідини менша, ніж з молекулами твердого тіла (рис. 8.6 а).

Рідина, яка не розтікається, а натягується міжмолекулярними силами в краплині, називається **незмочувальною** (вода на жирній поверхні та ін.). Рівнодіюча сил притягання молекул на межі зіткнення з молекулами рідини більша, ніж з молекулами твердого тіла (рис. 8.6, б).



а – змочувальна рідина; б – незмочувальна рідина

Рис. 8.6 – Явище змочування (θ – краєвий кут)

- Як видно на рис. 8.6 θ – краєвий кут:
- при повному змочуванні $\theta = 0$.
 - при повному незмочуванні $\theta = \pi$.

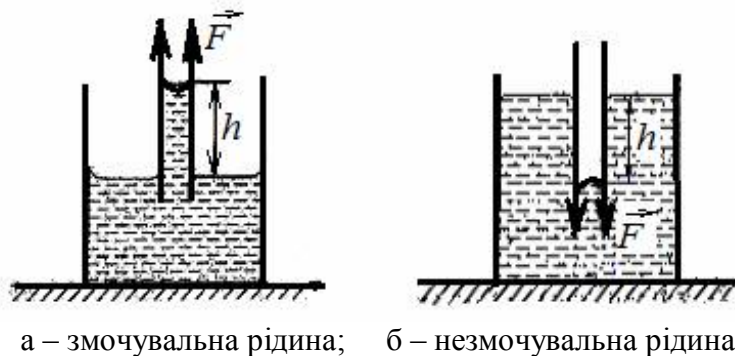


Рис. 8.7 – Рідина в капілярі

Змочування – це трифазне явище, оскільки воно відбувається на межі трьох фаз: твердої, рідкої та газоподібної.

У тонкій трубці – капілярі в разі змочування рідина піднімається по стінці, утворюючи увігнуту поверхню рідини (увігнутий меніск) (рис. 8.7, а).

Висота підйому рідини в трубці

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r}, \quad (8.14)$$

де σ – поверхнєве натягнення, Н/м;

r – радіус трубки, м;

ρ – густина рідини, кг/м³.

Незмочувальна рідина опускається в капілярі нависоту h , меніск при цьому опуклий (рис. 8.7, б).

Формула Лапласа. Додатковий тиск, зумовлений кривизною поверхні рідини, визначається за рівнянням:

$$\Delta p = \pm \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (8.15)$$

де R_1 і R_2 – радіуси **кривини** двох взаємно перпендикулярних перерізів поверхні рідини; знак «+» – для опуклого меніска, «-» – для увігнутого.

Тиски в точках A і A' на рис. 8.8:

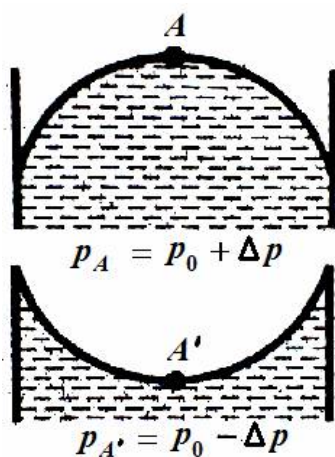


Рис. 8.8

p_0 – тиск на вільну поверхню, Па.

Якщо $R_1 = R_2 = R$ (сферична поверхня), тоді:

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R}. \quad (8.16)$$

Для тонкостінної порожнистої сфери (міхура), що має дві поверхні – зовнішню і внутрішню, лапласовий тиск визначається

$$\Delta p = 2 \cdot \frac{2\sigma}{R} = \frac{4\sigma}{R}. \quad (8.17)$$

8.6 Властивості пари

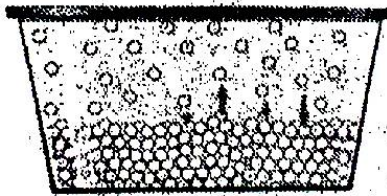


Рис. 8.9

Пара – це газоподібний стан речовини, в який можуть переходити як рідини (випаровування) (рис. 8.9), так і тверді тіла (сублімація).

Випаровування – процес перетворення рідини на пару. Відбувається за будь-якої температури.

Рідина при випаровуванні охолоджується, оскільки її покидають найбільш «швидкі» молекули, що знаходяться поблизу поверхневого шару. Значна частина кінетичної енергії руху молекул витрачається на роботу виходу ($E_k > A_{\text{вих}}$).

Для того, щоб температура рідини при випаровуванні не знижувалася, до неї потрібно підводити тепло.

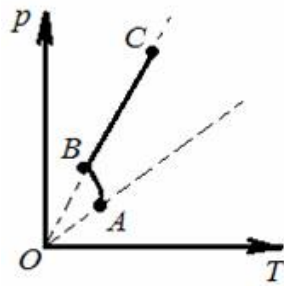
Швидкість випаровування залежить від:

- 1) вигляду рідини;
- 2) температури рідини;
- 3) площі вільної поверхні;
- 4) наявності вітру.

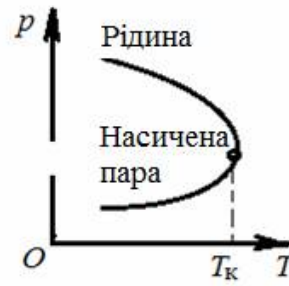
Конденсація – процес перетворення пари на рідину.

Пара, що знаходиться в динамічній (рухливій) рівновазі зі своєю рідиною, називається **насиченою парю**.

Динамічна рівновага настає тоді, коли швидкість випаровування дорівнює швидкості конденсації. Якщо випаровування переважає над конденсацією – пара не досягла стану насичення.



а) залежність тиску від температури;



б) залежність густини рідини і її насиченої пари від температури

Рис. 8.10

Графік залежності тиску від температури для насиченої та ненасиченої пари представлений на рис. 8.10, а:

AB – насичена пара; залежність p від T нелінійна, оскільки від T залежить концентрація молекул насиченої пари.

BC – ненасичена пара або ідеальний газ

$$p \approx T(p = nkT). \quad (8.18)$$

Графік залежності густини рідини та її насиченої пари від температури наведений на рис. 8.10, б.

Криві зливаються при $T = T_k$, де T_k – критична температура.

Цікаві факти!

Критичні температури: гелію – 268°C ; азоту – 147°C .

Характеристики вологості повітря. Вологість повітря характеризує кількість водяної пари в повітрі.

Розрізняють такі основні характеристики вологості:

- **Абсолютна вологість** (a , г/м^3) – це густина водяної пари (або кількість водяної пари в одиничному об'ємі повітря) що знаходиться в повітрі при даній температурі.
- **Відносна вологість** (f , %) – це відношення парціального тиску водяної пари p до тиску насичення (p_n) (показує, як близька дана водяна пара до стану насичення при даній температурі):

$$f = \frac{p}{p_n} 100\% \quad \text{або} \quad f = \frac{\rho}{\rho_n} 100\%. \quad (8.19)$$

Відносна вологість вимірюється у відсотках.

- **Точка роси** (t , °C) – це температура, за якої водяна пара, яка міститься в повітрі, стає насиченою (конденсується).

Для визначення відносної вологості повітря використовують:

1. Психрометр разом з психометричною таблицею;
2. Гігрометр – безперервна реєстрація вологості повітря.

Кипіння – пароутворення, що відбувається, як у всьому об'ємі рідини, так і з її поверхні за сталої температури (температури кипіння).

Умови кипіння:

- Рідина кипить при рівних значеннях тиску насиченої пари та зовнішнього тиску на рідину. Температура кипіння води дорівнює 100 °C, якщо зовнішній тиск – нормальний атмосферний тиск:

$$p_{\text{атм}} \approx 10^5 \text{ Па.} \qquad p_{\text{атм}} = p_{\text{зовн}} \quad (8.20)$$

- Температура кипіння рідини залежить від роду рідини, наявності домішок зовнішнього тиску на рідину.

При зменшенні зовнішнього тиску температура кипіння **знижується** і навпаки. Якщо з рідини видалити розчинене повітря (багатократним кип'ятінням) і можливі центри випаровування (порошинки, іони та ін.), то температура рідини може стати вищою за температуру кипіння. Такий стан називається **перегрітою рідиною**. Перегріту рідину можна отримати за умови, що зовнішній тиск став менший в порівнянні з тиском насиченої пари при даній температурі.

Цікаві факти!

Температура кипіння за нормального тиску $p_{\text{атм}} \approx 10^5 \text{ Па}$: води – 100 °C; ртуті – 357 °C; спирту – 78 °C.

Контрольні запитання

1. У яких агрегатних станах можуть знаходитися речовини в природі?
2. Як рухаються молекули рідини?
3. Як рухаються молекули газу? Чому?
4. Поясніть на основі молекулярно-кінетичної теорії явище розширення твердих тіл і рідин.
5. Що таке лінійне розширення?
6. Як пояснюється теплове розширення тіл?
7. Що показує коефіцієнт лінійного розширення?
8. Що показує коефіцієнт об'ємного розширення?
9. Які особливості теплового розширення води?

10. Що таке фазовий перехід?
11. Скільки фазових переходів ви можете вказати? Назвіть їх.
12. Які процеси з точки зору молекулярної будови відбуваються в речовині при фазових переходах?
13. Чому в прямих фазових переходах внутрішня енергія речовини збільшується?
14. Як змінюється внутрішня енергія при плавленні кристалічних твердих тіл?
15. Що потрібно знати, аби визначити кількість теплоти, необхідну для плавлення тіла, взятого при температурі плавлення?
16. Напишіть формулу кількості теплоти, необхідної для плавлення тіла, нагрітого нижче від температури плавлення.
17. Як змінюється внутрішня енергія тіла при твердінні? Чи змінюється при цьому температура тіла?
18. Як відбувається плавлення і твердіння аморфних речовин?
19. У чому відмінність процесів випаровування і кипіння?
20. За якої температури відбувається кипіння? Від чого залежить температура кипіння?
21. Що таке тверде тіло? Назвіть види твердих тіл.
22. Які властивості аморфних тіл?
23. Які властивості кристалічних твердих тіл?
24. Що таке пружна деформація, межа пружності, запас міцності?
25. Які властивості рідини?
26. Що таке поверхневий натяг, поверхнева енергія?
27. Що таке явище змочування? Які капілярні явища відбуваються в рідині?
28. Які властивості пари?
29. Що таке випаровування і конденсація?
30. Яку пару називають насиченою ненасиченою?
31. Що таке вологість повітря, абсолютна вологість відносна вологість?
32. Що таке кипіння? Які умови кипіння?

9 ОСНОВИ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ

Електромагнітні сили (електромагнітна взаємодія) виявляються в природі різноманітно. Ними пояснюються, наприклад, раніше вивчені сили тертя, сили пружності та сили взаємодії молекул. Електромагнітні сили виникають між тілами, які мають електричний заряд. Електричний заряд (заряд) – це одна з властивостей матерії, яка виявляється в тому, що між зарядженими тілами діють сили відштовхування і притягання. Ці сили у величезне число (10^4) разів більшініж гравітаційні сили.

9.1 Електростатика

Електростатика – розділ електродинаміки, яка вивчає взаємодію нерухомих (статичних) електричних зарядів.

9.1.1 Електричний заряд. Електризація тіл. Закон збереження заряду

Електричний заряд (q) – фізична величина, що характеризує властивість тіл і частинок вступати в електромагнітну взаємодію. Розрізняють позитивні та негативні заряди ($\pm q$).

Мінімальний електричний заряд, що існує в природі, це заряд елементарних частинок. Електричний заряд будь-якого тіла дорівнює цілому числу елементарних зарядів (e).

Електричний заряд дискретний, тобто не може бути в природі заряду меншого, ніж заряд електрона ($-e$) або протона ($+e$).

Точковим зарядом називається будь-яке заряджене тіло, розмірами якого можна знехтувати в даній задачі.

$$[q] = 1 \text{ А} \cdot \text{с} = 1 \text{ Кл (кулон)}$$
$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

1 кулон – це заряд, що протікає крізь поперечний переріз провідника за одну секунду при силі постійного струму 1 ампер.

Якщо створити надлишок (або нестачу) електричних зарядів того або іншого знаку, то тіло буде наелектризовано.

Розрізняють три види електризації:

1. *Електризація зіткненням* (тертям) різнорідних тіл. При контакті різнорідних речовин невелика частина електронів атомів однієї з речовин (тої, де зв'язок електронів з атомом відносно слабкий) переходить в іншу речовину. Тіло з надмірною кількістю електронів заряджене негативно, з нестачею – позитивно (рис. 9.1, а).

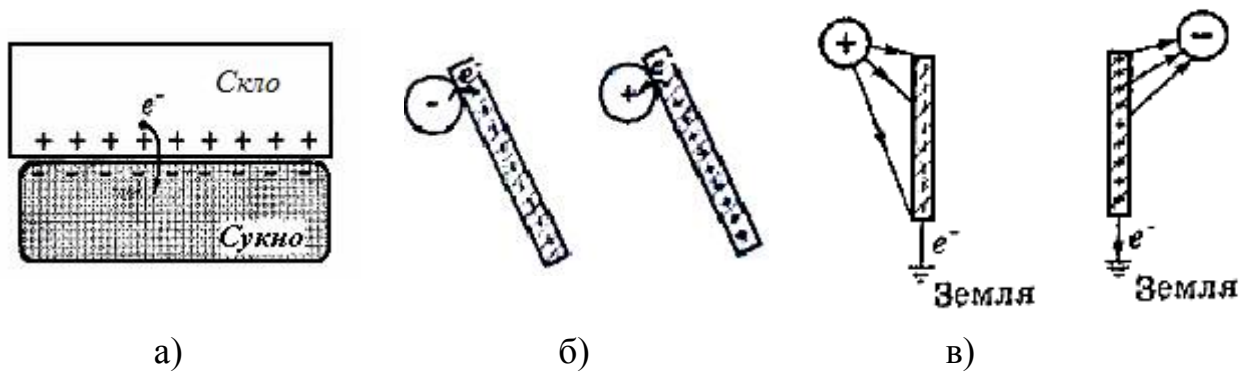


Рис. 9.1 – Електризація

2. Електризація провідників зіткненням з наелектризованим тілом. При цьому провідник електризується, а наелектризоване тіло частково розряджається (рис. 9.1, б).

3. Електризація через вплив. Провідник вноситься до електричного поля і короткочасно заземлюється (досить дотику руки). Провідник виявляється наелектризованим рівномірно з тілом, яке створює електричне поле (рис. 9.1, в).

Електризація тіл при тісному контакті застосовується в електрокопіювальних пристроях («Ксерокс»).

Закон збереження заряду: алгебраїчна сума зарядів всіх тіл ізольованої системи зберігається незмінною при будь-яких процесах або явищах усередині системи:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = const \quad (9.1)$$

9.1.2 Взаємодія зарядів. Закон Кулона

Різнорізно заряджені тіла та частинки *притягуються*, однойменно заряджені – *відштовхуються*.

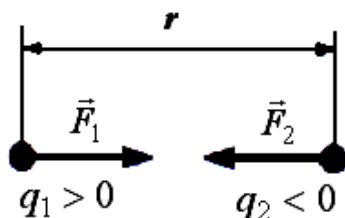


Рис. 9.2

Закон Кулона: модуль сили електростатичної взаємодії між двома нерухомими точковими зарядами q_1 та q_2 прямопропорційний добутку модулів цих зарядів і оберненопропорційний квадрату відстані r між ними (рис. 9.2):

$$F_k = \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot r^2}, \quad [F_k] = 1 \text{ Н}, \quad (9.2)$$

де q_1, q_2 – взаємодіючі заряди (їх абсолютні значення), Кл;

r – відстань між ними, м;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична стала;

ε – відносна діелектрична проникність середовища, в якому знаходяться заряди (для вакууму $\varepsilon = 1$).

Діелектрична проникність – це фізична величина, яка характеризує електричні властивості речовини та показує, у скільки разів сила взаємодії зарядів в даному середовищі меншавід сили їх взаємодії у вакуумі.

Закон Кулона можна застосовувати для заряджених тіл, які мають форму кулі.

При розв'язанні задач за допомогою формул, в які входить множник $\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$, рекомендується підставляти просто його числове значення

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}. \quad (9.3)$$

Тоді формулу закону Кулона можна записати:

$$F_{\text{к}} = k \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\varepsilon \cdot r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\varepsilon \cdot r^2}. \quad (9.4)$$

9.1.3 Електричне поле. Електростатичне поле. Напруженість електричного поля. Принцип суперпозиції полів

Електричне поле – це вид матерії (окремий випадок електромагнітного поля), основною особливістю якої є дія на тіла або частинки, що мають електричний заряд.

Розрізняють два основні види електричних полів: електростатичне і вихрове (індукційне).

Електростатичні поля – це електричні поля, що існують довкола нерухомих в даній системі відліку тіл або частинок, які мають електричний заряд.

Напруженість електричного поля (\vec{E}) – силова характеристика поля. Це векторна величина, що дорівнює відношенню сили, з якою поле діє на пробний заряд, до величини цього заряду:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_k}{q_0}, \quad (9.5)$$

$$[E] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}. \quad (9.6)$$

Пробний заряд (q_0) – це нерухомий точковий позитивний заряд, що потрапляє в електричне поле.

Сила, з якою електростатичне поле діє на точковий електричний заряд, називається кулонівською силою:

$$\vec{F}_k = q \cdot \vec{E}. \quad (9.7)$$

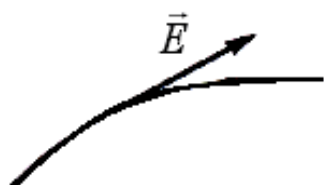


Рис 9.3

Лінії напруженості (силові лінії) електричного поля – лінії, дотичні до яких в кожній точці, через яку вони проходять, збігаються з вектором напруженості поля. (рис. 9.3).

Лінії напруженості електростатичного поля починаються на позитивно зарядженому тілі й закінчуються на негативно зарядженому тілі (рис. 9.4).

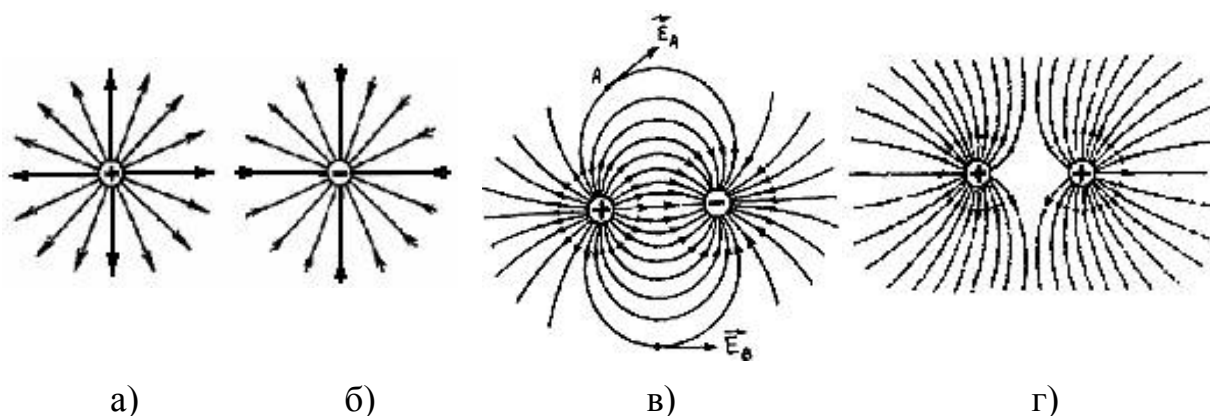


Рис. 9.4

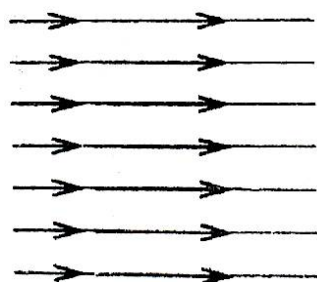


Рис. 9.5

Силкові лінії нескінченні та ніде в просторі не перетинаються. Силкові лінії проходять ближче одна до іншої (тобто частіше) там, де напруженість поля більша.

Однорідним називається таке поле (рис. 9.5), в якого напруженість однакова в усіх точках

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_2 = \dots = \vec{E}_n = \text{const}. \quad (9.8)$$

Принцип суперпозиції (накладення): напруженість електричного поля системи зарядів дорівнює векторній сумі напруженості полів, що створюються кожним з них окремо:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n. \quad (9.9)$$

Поля не взаємодіють, а накладаються. Заряди взаємодіють, оскільки поле одного заряду діє на інший, і навпаки (рис. 9.6, а).

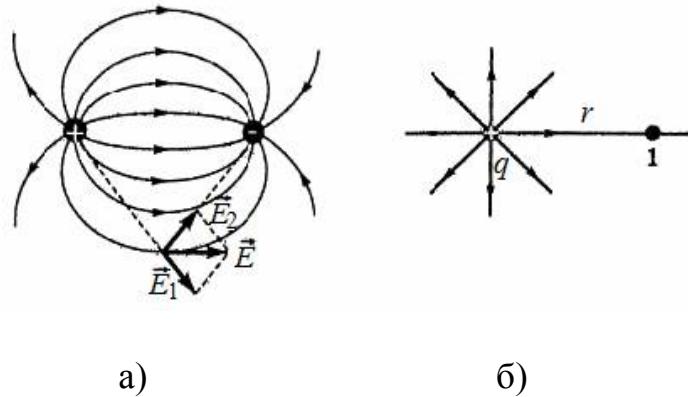


Рис. 9.6

Напруженість поля точкового заряду:

$$E_1 = k \cdot \frac{|q|}{\varepsilon \cdot r^2} = \frac{|q|}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}. \quad (9.10)$$

Такий же вигляд має напруженість поля зарядженої сферичної поверхні, де r – відстань від центра сфери (рис. 9.6, б).

Поверхнева густина заряду (σ) – це величина, рівна електричному заряду, розподіленому на одиничній площині поверхні (рис. 9.7, а):

$$\sigma = \frac{q}{S}, [\sigma] = \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}, \quad (9.11)$$

Напруженість поля нескінченної плоскої поверхні (однорідне поле):

$$E_{\text{пл}} = \frac{|\sigma|}{2\varepsilon_0\varepsilon}. \quad (9.12)$$

Для рівномірно різнойменно заряджених паралельних нескінчених площин напруженість подвоюється (рис. 9.7, б):

$$E = 2E_{\text{пл}} = \frac{|\sigma|}{\varepsilon_0\varepsilon}. \quad (9.13)$$

У навколишньому просторі $E = 0$.

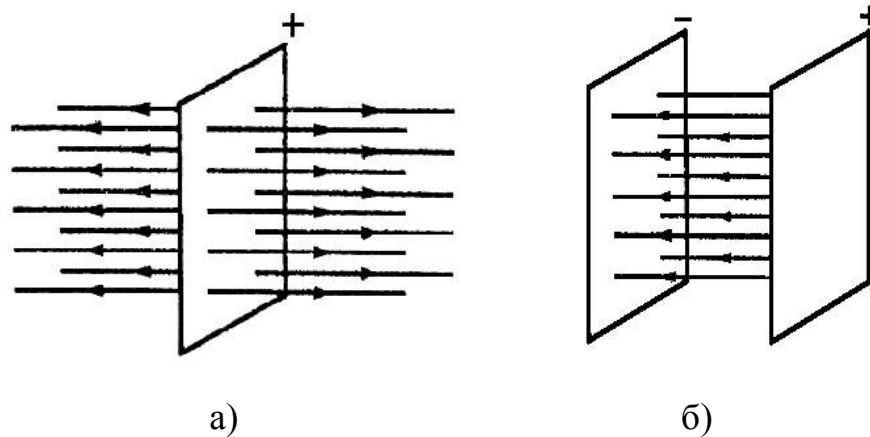


Рис. 9.7

9.1.4 Робота в електростатичному полі. Потенціал поля. Різниця потенціалів двох точок поля. Напряга

Будь-яка взаємодія, включаючи й електромагнітну, описується фізичними величинами, введеними в механіці (сила, переміщення, робота сили, енергія).

Рух зарядженої частинки в однорідному ($\vec{E} = const$) електростатичному полі (рис. 9.8, б) аналогічній руху в однорідному ($g = const$) гравітаційному полі (рис. 9.8, а).

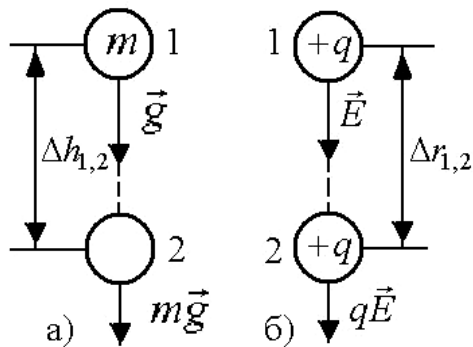


Рис. 9.8

При переміщенні частинки на Δh_{12} (Δr_{12}) здійснюється **робота сил**:

а) у гравітаційному полі $A_{гр} = mg\Delta h_{12}$;

б) у електростатичному полі

$$A_k = F_k \Delta r_{12} = qE\Delta r_{12} = k \frac{qq_0 \cdot \Delta r_{12}}{\varepsilon \Delta r_{12}^2} = k \frac{q \cdot q_0}{\varepsilon \Delta r_{12}}. \quad (9.14)$$

Так само, як і в разі гравітаційного поля (рис. 9.8, а), **робота сил електростатичного поля** при переміщенні зарядженої частинки з однієї точки (1) в точку (2) не залежить від форми траєкторії, а залежить лише від початкового та кінцевого положення **частинки**. Це означає, що **електростатичне поле потенціальне**.

Робота електростатичного поля дорівнює різниці (зменшенню) потенціальної енергії (W) зарядженої частинки в її початковому і кінцевому положенні:

$$A_{12} = W_1 - W_2 = \frac{kq_0q}{\epsilon\Delta r_{12}}. \quad (9.15)$$

Енергетична характеристика поля – **потенціал** (φ).

Потенціал електростатичного поля в даній точці – скалярна фізична величина, що дорівнює відношенню потенціальної енергії, яку має пробний позитивний заряд, поміщений в дану точку поля, до значення цього заряду (якщо його потенціальну енергію в нескінченності вважати рівною нулю).

$$\varphi_1 = \frac{W_{n1}}{q_0}, \text{ якщо } W_{n\infty} = 0; \quad [\varphi] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = 1 \text{ В (вольт)} \quad (9.16)$$

Потенціал електростатичного поля, створеного точковим зарядом q на відстані r від нього

$$\varphi = k \frac{q}{\epsilon r} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r} \quad (9.17)$$

Потенціальна енергія заряду q в точці, що має потенціал φ :

$$W = q\varphi \quad [W] = 1 \text{ Дж} \quad (9.18)$$

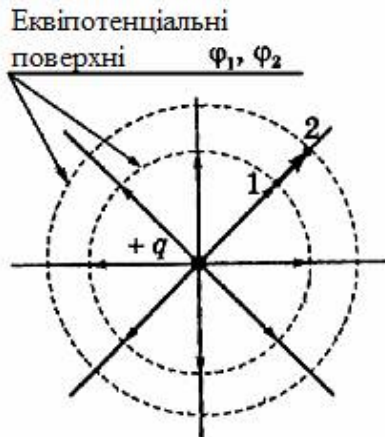


Рис. 9.9

Еквіпотенціальна поверхня – це поверхня, всі точки якої мають однаковий потенціал (рис. 9.9).

Еквіпотенціальна поверхня і лінії напруженості поля в кожній точці взаємно перпендикулярні.

Поверхня провідного зарядженого тіла еквіпотенціальна.

Робота по переміщенню заряду еквіпотенціальною поверхнею дорівнює нулю.

Різниця потенціалів двох точок поля – це величина, яка чисельно дорівнює роботі кулонівських сил по переміщенню одиничного позитивного заряду з точки 1 в точку 2:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{К1-2}}{q}, \quad (9.19)$$

Сторонні сили – це будь-які, окрім кулонівських, сили, що діють на заряд.

Напруга (U) – це величина, яка чисельно дорівнює роботі всіх (кулонівських і сторонніх) сил при перенесенні одиничного позитивного заряду через дану ділянку:

$$\boxed{U = \frac{A_K + A_{ст}}{q}} [U] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = 1 \text{ В (вольт)} \quad (9.20)$$

Якщо діють лише кулонівські сили, тоді

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = -\Delta\varphi = \frac{A}{q} \quad (9.21)$$



Рис. 9.10

Робота по переміщенню заряду (q) в електростатичному полі:

$$\boxed{A = qU = q(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (9.22)$$

У однорідному електростатичному полі вектор напруженості – величина стала ($\vec{E} = const$).

Для однорідного електростатичного поля робота переміщення заряду q на відстань d дорівнює (рис. 9.10)

$$A = F_k S \cos \alpha = qEd. \quad (9.23)$$

Тоді модуль вектора напруженості

$$E = \frac{A}{qd}, \quad (9.24)$$

де d – проекція переміщення заряду q на лінію \vec{E} .

З формул (9.22, 9.24) випливає, що напруженість в будь-якій точці електростатичного поля дорівнює зміні потенціалу ($\varphi_1 - \varphi_2 = -\Delta\varphi$) до одиниці довжини лінії напруженості поля (d):

$$\boxed{E_x = -\frac{\Delta\varphi}{d} = \frac{U}{d}}, [E] = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}. \quad (9.25)$$

Вектор напруженості поля \vec{E} завжди спрямований у бік зменшення потенціалу.

Задача. Електрон, який рухався із швидкістю 10^7 м/с, потрапляє в однорідне електричне поле. Він проходить різницю потенціалів 1136 В і прискорюється. Знайти швидкість електрона після прискорення.

Дано:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = 1136 \text{ В}$$

$$v_1 = 10^7 \text{ м/с}$$

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$v_2 = ?$$

Розв'язання:

На електрон масою m і зарядом e в електричному полі діє сила $\vec{F}_k = e\vec{E}$, під дією якої він летить рівноприскорено.

При цьому електричне поле здійснює роботу $A = |e| \cdot U$. За законом збереження і перетворення енергії ця робота дорівнює зміні кінетичної енергії електрона:

$$A = \Delta E_k = E_{k2} - E_{k1} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

Тоді з рівняння $|e| \cdot U = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$ знайдемо нову швидкість електрона:

$$v_2 = \sqrt{v_1^2 + \frac{2|e|U}{m}}.$$

Обчислення:

$$v_2 = \sqrt{(10^7)^2 + \frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1136}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 2,24 \cdot 10^7 \text{ м/с}.$$

Відповідь: $v_2 = 2,24 \cdot 10^7$ м/с.

9.1.5 Електричне поле в речовині

За здатністю проводити електричні заряди всі речовини умовно поділяють на провідники, діелектрики (непровідники) та напівпровідники.

Провідники – це речовини, в яких електричні заряди вільно переміщуються. Це ґрунт, тіло людини, всі метали в твердому й рідкому станах, водні розчини солей, кислот, лугів, розплавлені солі та іонізовані гази.

Діелектрики (ізолятори) – речовини, в яких електричні заряди, що належать їм, залишаються на одних і тих же місцях. До діелектриків відносяться янтар, ебоніт, каучук, фарфор, повітря, сухе дерево, капрон.

Напівпровідники при кімнатній температурі мають хоч і дуже низьку, але все таки помітну електропровідність, тобто здатні проводити електричний струм. З підвищенням температури (або при опроміненні) їх електропровідність збільшується. Напівпровідники займають проміжне місце між провідниками та діелектриками. До них відносяться селен, кремній, германій, окис міді.

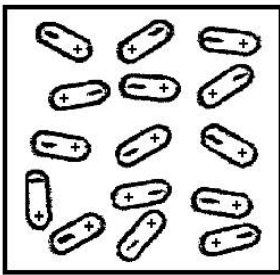


Рис.9.12

Діелектрики в електростатичному полі (поляризація діелектрика). Молекули діелектриків можна розглядати як електричні **диполі** (рис. 9.12). Тепловий рух приводить до хаотичної орієнтації диполів між собою. Через це в будь-якому об'ємі діелектрика, який містить велике число молекул, і на його поверхні електричний заряд в середньому дорівнює нулю, тоді напруженість електростатичного поля в діелектрику в середньому також рівна.

Якщо помістити діелектрик в однорідне електростатичне поле, то це поле створює момент сил (рис. 9.13).

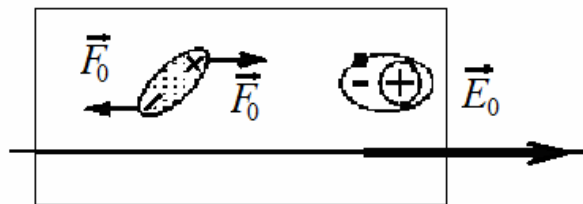


Рис. 9.13– Діелектрик в однорідному електростатичному полі

Під дією моменту сил диполь обертається. Його вісь спрямована вздовж силових ліній поля. Позитивні заряди зміщуються при цьому у напрямі електростатичного поля, а негативні – в протилежний бік (рис. 9.14). Такі заряди називаються зв'язаними.

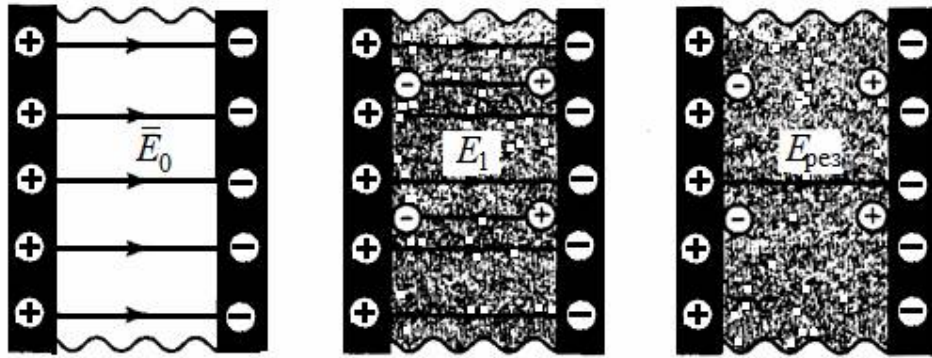


Рис. 9.14

$$E_{\text{рез}} = E_0 - E_1 \quad (9.26)$$

Зсув позитивних і негативних зв'язаних зарядів діелектрика в протилежні боки називають **поляризацією**.

Зв'язаний заряд створює електричне поле напруженістю \vec{E}_1 , направлене в діелектрику проти напруженості зовнішнього поля \vec{E}_0 . Через це поле всередині діелектрика ослабляється в ε разів:

$$E_{\text{рез.}} = \frac{E_0}{\varepsilon}. \quad (9.27)$$

Відносна діелектрична проникність (ε) середовища – це число, що визначає, в скільки разів напруженість зовнішнього поля \vec{E}_0 більша від напруженості поля в діелектрику. Її величина залежить від вигляду матеріалу середовища:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E_{\text{рез}}}. \quad (9.28)$$

Цікаві факти!

$$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 81; \quad \varepsilon_{\text{парафіну}} = 2; \quad \varepsilon_{\text{повітря}} = 1.$$

Провідники в електричному полі (електростатична індукція). У металах носіями вільних зарядів є електрони. Коли поля немає, вільні електрони розташовані в провіднику хаотично (рис. 9.15, а). Під дією зовнішнього електростатичного поля (\vec{E}_0) електрони металеві пластини рухаються протилежно цьому полю. На протилежних боках провідника накопичуються різнойменні заряди. Ліва частина пластини заряджає негативно, а права – позитивно (рис. 9.15, б).

Це явище називається **електростатичною індукцією**. Якщо розділити пластину вздовж лінії MN , то обидві половини виявляться зарядженими.

Накопичені заряди створюють своє поле \vec{E}_1 , яке накладається на зовнішнє поле \vec{E}_0 і компенсує його. Тому результуюче поле всередині провідника при рівновазі зарядів дорівнює нулю $E_{рез.} = 0$ (рис. 9.15, в).

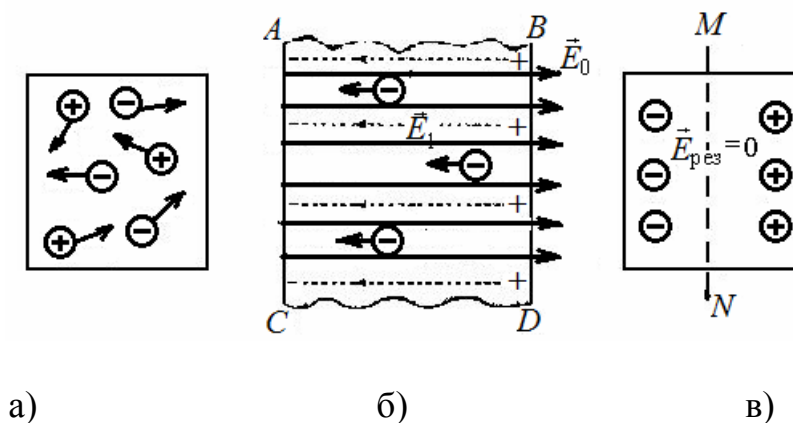


Рис. 9.15

Розподіл електричних зарядів на поверхні провідника. Оскільки $E_{рез.} = 0$, тоді, при рівновазі зарядів, заряд усередині провідника також дорівнює нулю.

Весь статичний заряд провідника розташований на його поверхні.

Розподіл заряду на поверхні характеризується поверхневою густиною заряду σ

$$\sigma = \frac{\Delta q}{\Delta S}, \quad (9.29)$$

де Δq – заряд, який знаходиться на ділянці поверхні ΔS .

Чим більша кривизна поверхні, тим більша густина заряду σ (рис. 9.16).

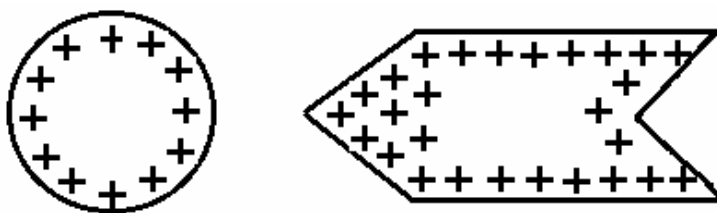


Рис. 9.16

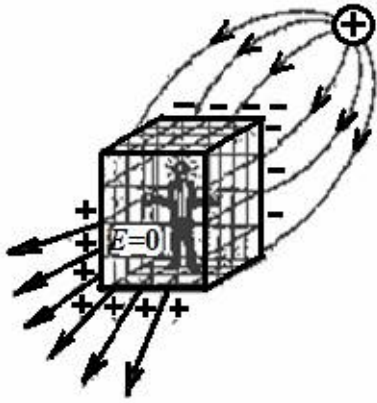


Рис. 9.17

Потенціал в усіх точках поверхні провідника має однакову величину. **Електростатичний захист** – ізоляція від електричного поля металевою сіткою і ін., яка оточує, наприклад тіло людини або електролампу (рис. 9.17).

9.1.6 Електрична ємність. Конденсатори. Енергія електричного поля

Електроємність. Коли на провіднику збільшується заряд q , то пропорційно заряду зростає потенціал провідника φ . Це справедливо для провідників будь-якої геометричної форми. Відношення заряду провідника до його потенціалу не залежить від величини заряду, що знаходиться на провіднику, і визначається властивостями самого провідника, а також середовища, в якому він знаходиться. Характеристикою електричних властивостей провідника, яка визначає можливість накопичення зарядів на даному провіднику, є електроємність.

Фізична величина, яка визначається відношенням заряду q відокремленого провідника до його потенціалу φ , називається **електроємністю** (ємністю) відокремленого провідника:

$$C = \frac{q}{\varphi}. \quad (9.32)$$

Іншими словами, електроємністю (ємністю) відокремленого провідника називається фізична величина, що чисельно дорівнює заряду, який змінює потенціал провідника на одну одиницю.

Відокремленим називають провідник, який знаходиться далеко від заряджених тіл і інших провідників.

Ємність провідника залежить від його лінійних розмірів і геометричної форми, але не залежить від матеріалу провідника та його

агрегатного стану. Геометрично подібні провідники мають електроємності прямо пропорційні їх лінійним розмірам. Ємність провідника прямо пропорційна відношній діелектричній проникності середовища, в якому знаходиться провідник.

Ємність відокремленої кулі.

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon R, \quad (9.33)$$

де R – радіус кулі, м; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична стала; ϵ – відносна діелектрична проникність середовища, в якому знаходиться куля.

Взаємною електроємністю (взаємною ємністю) двох провідників називається фізична величина, що чисельно дорівнює заряду q , який потрібно перенести з одного провідника на інший для того, щоб змінити різницю потенціалів між ними ($\varphi_1 - \varphi_2$) на одиницю:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}, \quad \text{де } U = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (9.34)$$

Взаємна ємність залежить від геометричної форми, лінійних розмірів і взаємного розташування провідників і не залежить від матеріалу провідників та їх агрегатних станів. Взаємна ємність прямо пропорційна відношній діелектричній проникності середовища, в якому знаходяться провідники.

$$[C] = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{В}} = 1 \text{ Ф [фарад]}. \quad (9.35)$$

Фарад – це електрична ємність таких двох провідників, між якими при наданні кожному з них заряду 1 Кл (± 1 Кл) виникає різниця потенціалів 1 В:

Оскільки ємність 1 Ф дуже велика, то в практиці використовують 1 мкФ = 10^{-6} Ф, 1 пФ = 10^{-12} Ф.

Конденсатори. Конденсатор складається з двох провідників, заряджених різнойменно рівними за абсолютними значеннями зарядами.

Провідники повинні мати таку геометричну форму й мають бути розташовані один відносно одного так, щоб електричне поле, створене цими провідниками, було зосереджене в просторі між ними.

Провідники, які створюють конденсатор, називаються його обкладками (обкладка конденсатора). Ємність конденсатора є взаємною ємністю його обкладок. Конденсатори використовують для накопичування електричної енергії.

Плоский конденсатор складається з двох паралельно плоских пластин, заряджених однаковими за абсолютними значеннями, але

різномісними зарядами (рис. 9.18). Пластини конденсатора знаходяться на відстані d одна від одної. При зарядженні конденсатора можна надати одній з пластин деякий заряд, а іншу заземлити. Тоді на заземленій пластині залишиться заряд, протилежний за знаком, але рівний за значенням заряду першої пластини.

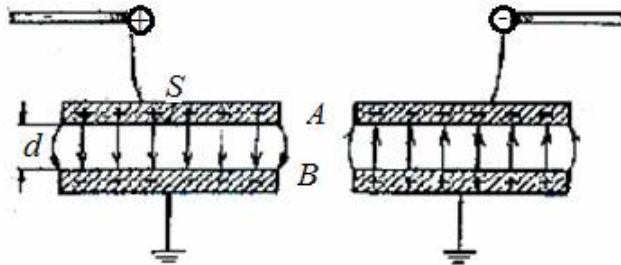


Рис. 9.18

Ємність плоского конденсатора

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad (9.36)$$

де S – площа кожної обкладки або меншої з них, м^2 ;

d – відстань між обкладками, м ;

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{Ф/м}$ – електрична стала;

ϵ – відносна діелектрична проникність речовини, розташованої між обкладками конденсатора.

З'єднання конденсаторів. Для здобуття потрібної електроємності конденсатори з'єднують один з одним в батареї паралельно або послідовно. На рис. 9.19 показано **паралельне** з'єднання конденсаторів. Різниця потенціалів на їх пластинах однакова:

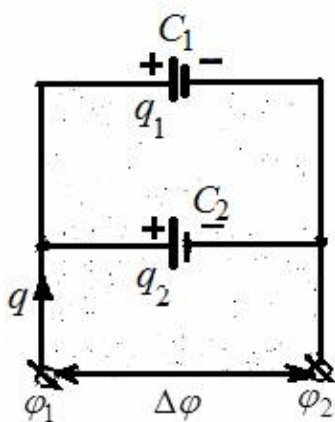


Рис. 9.19

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi = \text{const}. \quad (9.37)$$

Загальний заряд на всіх n конденсаторах

$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_n. \quad (9.38)$$

Якщо підставити значення q з формули, тоді отримаємо:

$$C\Delta\varphi = C_1\Delta\varphi + C_2\Delta\varphi + \dots + C_n\Delta\varphi, \quad (9.39)$$

або

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n. \quad (9.40)$$

Отже, *ємність батареї паралельно сполучених конденсаторів дорівнює сумі ємностей цих конденсаторів.*

На рис. 9.20 показано *послідовне* з'єднання конденсаторів, тоді

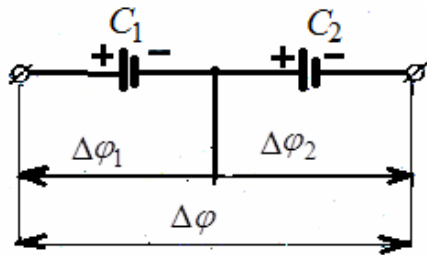


Рис. 9.20

$$q_1 = q_2 = \dots = q_n; \quad q = \text{const}; \quad (9.41)$$

$$\Delta\phi = \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2 + \dots + \Delta\phi_n; \quad (9.42)$$

$$\frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \dots + \frac{q}{C_n}; \quad (9.43)$$

або

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}. \quad (9.44)$$

Ємність батареї послідовно з'єднаних конденсаторів завжди менша, ніж ємність кожного з цих конденсаторів окремо.

Енергія електростатичного поля. Енергія зарядженого провідника ємністю \$C\$ (зарядженого конденсатора):

$$W = \frac{C\Delta\phi^2}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C}. \quad (9.45)$$

Взаємна енергія двох точкових зарядів \$q_1\$ і \$q_2\$

$$W = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r_{12}} = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r_{12}}. \quad (9.46)$$

Електронвольт (еВ) – енергія, якої набуває частинка із зарядом, рівним елементарному заряду, яка пройде у вакуумі прискорюючу різницю потенціалів, рівну 1 вольту.

Контрольні запитання:

1. Поясніть явище електризації та електричної індукції з точки зору електронної теорії.
2. Чому дорівнює елементарний електричний заряд?
3. Які види зарядів існують в природі?
4. У яких одиницях вимірюється електричний заряд в системі СІ?
5. Чи може наелектризоване тіло мати заряд, менший ніж заряд електрона?

6. Що відбувається при контакті зарядженого і незарядженого тіл?
7. Як можуть взаємодіяти заряджені тіла?
8. Як взаємодіють однойменні електричні заряди?
9. Як взаємодіють різнойменні електричні заряди?
10. Від чого залежить модуль сили взаємодії наелектризованих тіл?
11. Запишіть математичний закон взаємодії точкових зарядів.
12. Що таке електричне поле?
13. Що називається напруженістю електростатичного поля? Запишіть формулу напруженості електростатичного поля точкового заряду на відстані r від нього.
14. Дайте визначення одиниці напруженості електричного поля в системі СІ.
15. Що називається лінією напруженості електростатичного поля?
16. Яких правил потрібно дотримуватися при побудові електричних силових ліній?
17. Яке електричне поле називається однорідним?
18. У чому полягає принцип суперпозиції (накладення) електричних полів?
19. Від чого залежить робота сили електростатичного поля?
20. Що таке потенціал поля?
21. Що називають еквіпотенціальною поверхнею?
22. Чому дорівнює різниця потенціалів?
23. Що таке напруга?
24. Які сили називають сторонніми?
25. Які речовини називають провідниками, діелектриками, напівпровідниками?
26. Що називають поляризацією?
27. Що таке діелектрична проникність?
28. Що називають електростатичною індукцією?
29. Як розподіляється електростатичний заряд в провіднику?
30. Що називають електричною ємністю? У яких одиницях вона вимірюється?
31. Як влаштований конденсатор? Чому дорівнює ємність плоского конденсатора?
32. Чому дорівнює ємність конденсаторів, сполучених паралельно?
33. Чому дорівнює ємність конденсаторів, сполучених послідовно?
34. Чому дорівнює енергія електростатичного поля?

9.2 Постійний електричний струм

9.2.1 Електричний струм. Сила струму. Густина струму

Електричний струм

це впорядкований (направлений) рух вільних носіїв заряду.

За **напрям струму** вважається напрям, в якому рухався позитивний заряд.

Речовини, в яких можливий такий рух, називаються **провідниками електрики**.

Струм, що виникає в провідниках, називається **струмом провідності**.

Умови існування струму:

1. Наявність вільних носіїв заряду.
2. Наявність електричного поля.
3. Замкнутий електричний ланцюг.

У металах вільні носії заряду – це «вільні» електрони.

Сила струму (I) – скалярна фізична величина, модуль якої дорівнює кількості заряду q , що переноситься за одиницю часу крізь площу поперечного перерізу провідника:

$$\boxed{I = \frac{q}{t}}, \quad [I] = 1 \text{ А}, \text{ (ампер)}, \quad (9.47)$$

$$q = It, \quad [q] = 1 \text{ А} \cdot \text{с} = 1 \text{ Кл}. \quad (9.48)$$

Ампер – сила постійного струму, який проходить по двох паралельних провідниках нескінченної довжини і нехтовно малого кругового перерізу, розташованих на відстані 1 м один від одного у вакуумі, та викликає між ними силу взаємодії, рівну $2 \cdot 10^{-7}$ Н на кожен метр їх довжини.

Густина струму (\vec{j}) – векторна фізична величина, модуль якої дорівнює відношенню сили струму до площі перерізу, крізь який проходить струм:

$$\boxed{j = \frac{I}{S}}, \quad [j] = \frac{\text{А}}{\text{м}^2}. \quad (9.49)$$

Вектор густини струму спрямований уздовж струму.

Якщо заряд вільного носія заряду q_0 , концентрація яких в провіднику n (кількість в одиниці об'єму), середня швидкість впорядкованого руху \bar{U} ,

а площа поперечного перерізу провідника S , тоді сила струму I у провіднику визначається:

$$I = q_0 n \bar{v} S \quad (9.50)$$

Густина струму провідності в металах, де $q_0 = e$:

$$j = ne\bar{v} \quad (9.51)$$

Постійний струм – це струм, сила і напрям якого не змінюється з часом.

9.2.2 Опір металевих провідників. Провідність

Опір провідника (R) – це власні властивості провідника створювати протидію струму, що проходить по ньому.

Опір металевого провідника залежить від його розмірів, матеріалу і температури:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (9.52)$$

де ρ – питомий опір матеріалу провідника, Ом·м;

l – довжина провідника, м;

S – площа поперечного перерізу провідника, м².

$$[R] = 1 \frac{\text{В}}{\text{А}} = 1 \text{ Ом}. \quad (9.53)$$

Одиниця виміру опору називається ом (Ом).

1 Ом – опір такого провідника, в якому при напрузі на його кінцях 1 В тече струм силою $I=1$ А.

ρ – питомий опір провідника, величина чисельно дорівнює опору провідника довжиною 1 м з поперечним перерізом 1 м²:

$$[\rho] = 1 \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}^2}{\text{м}} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}, \quad (9.54)$$

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t) \quad (9.55)$$

Термічний коефіцієнт опору (α) – відносна зміна опору провідника при нагріванні його на один градус.

Для чистих металів:

$$\alpha \approx \frac{1}{273} \text{K}^{-1} \quad (9.56)$$

В деяких металах і сплавах при температурах T , близьких до абсолютного нуля (0,2-25 К), питомий опір стає рівним нулю – **надпровідність**.

Електрична провідність провідника (G) – це величина, зворотна опору провідника:

$$G = \frac{1}{R} \quad (9.57)$$

Електрична провідність вимірюється одиницями, званими сименс (См):

$$[G] = \frac{1}{\text{Ом}} = 1 \text{ См} \quad (9.58)$$

9.2.3 Електрорушійна сила (ЕРС)

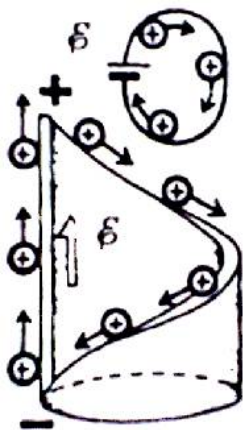


Рис. 9.21 Всі вони перетворюють різні форми енергії наелектричну.

Для підтримки струму в провіднику наявні в ньому вільні заряди повинні діяти електричне поле, яке створюється неелектричними сторонніми силами. Таке стає в часі електричне поле називають **стаціонарним полем**. Наявність в провіднику стаціонарного електричного поля рівнозначно існуванню постійної різниці потенціалів ($\varphi_1 - \varphi_2 = \text{const}$) на кінцях провідника. До джерел сторонніх сил (джерел електроживлення) належать хімічні (батареї, акумулятори), електромагнітні (звичайні електромашинні генератори), світлові (фотоелементи) і ін.

При переміщенні електричних зарядів здійснюється робота.

Джерело ЕРС – це пристрій, в якому діють сторонні сили, що розділяють заряди (рис. 9.21).

Кулонівські сили завжди з'єднують різнойменні заряди.

У замкнутому ланцюзі діють сторонні сили в джерелі та кулонівські сили вусьому ланцюзі, але робота кулонівських сил в замкнутому контурі дорівнює нулю.

Електрорушійна сила джерела ($\xi_{дж}$) – скалярна фізична величина, чисельно рівна роботі сторонніх сил в джерелі з перенесення одиничного позитивного заряду через весь ланцюг.

$$\xi_{дж} = \frac{A}{q}, \quad [\xi] = 1 \text{ В (вольт)}. \quad (9.59)$$

Робота з перенесення заряду через весь ланцюг дорівнює сумі робіт на зовнішніх ділянках ланцюга $A_{зовн}$ та середині джерела $A_{вн}$ (внутрішня ділянка ланцюга з опором r):

$$A = A_{зовн} + A_{вн}. \quad (9.60)$$

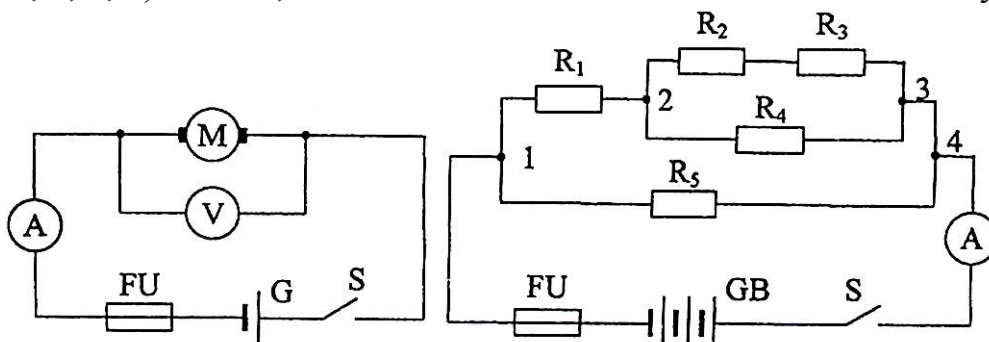
$$\xi_{дж} = U_{зовн} + U_{вн}. \quad (9.61)$$

9.2.4 Електричний ланцюг

Електричним ланцюгом називають сукупність електричних пристроїв, які створюють шлях для електричного струму, електромагнітні процеси в якому можуть описуватись за допомогою електричних величин – електрорушійної сили, струму та напруги.

Для аналізу процесів і розрахунку електричний ланцюг замінюють еквівалентною схемою заміщення (схемою ланцюга).

Ділянка електричного ланцюга, по якій проходить постійний струм, називається **гілкою**. Електричний ланцюг, який складається з однієї гілки, називається **нерозгалужений**. Схема такого ланцюга представлена на рис. 9.22, а. Якщо електричний ланцюг складається з декількох гілок, то він називається **розгалужений**. Приклад схеми такого ланцюга показаний на рис. 9.22, б. Місце з'єднання трьох і більше гілок називають **вузлом** (точки 1, 2, 3, 4). Видно, що гілка – це ділянка ланцюга між двома вузлами.

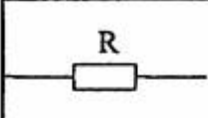
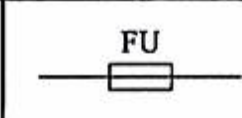
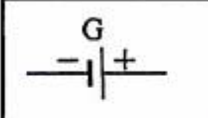
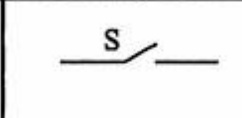

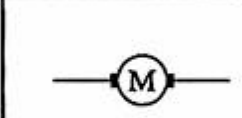
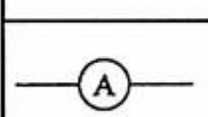
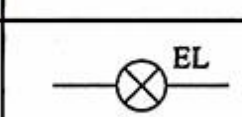
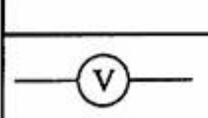
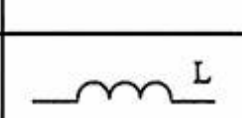


а) нерозгалужений

б) розгалужений

Рис. 9.22 – Електричний ланцюг

Таблиця 9.1 – Умовні позначення деяких елементів, які використовуються в електричних схемах

| | | | |
|---|--------------------------------|--|------------------------------------|
|  | Резистор |  | Запобіжник плавкий |
|  | Джерело струму (ξ ; r) |  | Ключ (вимикач) |
|  | Батарея джерел струму |  | Електромотор постійного струму |
|  | Амперметр |  | Лампа розжарювання (освітлювальна) |
|  | Вольтметр |  | Катушка індуктивності |

9.2.5 Закон Ома

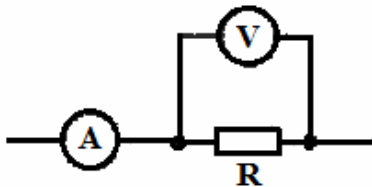


Рис. 9.23

Закон Ома для ділянки ланцюга (рис. 9.23): сила струму в ділянці ланцюга прямо пропорційна прикладеній напрузі U і обернено пропорційна опору провідника R :

$$I = \frac{U}{R}. \quad (9.62)$$

Закон Ома для повного ланцюга: сила струму в замкнутому ланцюзі дорівнює відношенню електрорушійної сили джерела до повного опору ланцюга:

$$I = \frac{\xi_{\text{дж}}}{R + r}. \quad (9.63)$$

Тоді із закону Ома для повного ланцюга:

– Напряга на полюсах замкнутого джерела ЕРС (рис. 9.24, а):

$$U = \xi_{\text{дж}} - Ir. \quad (9.64)$$

– Напряга на полюсах не замкнутого джерела ЕРС (рис. 9.24,б):

$$U = \xi_{дж} \cdot r \quad (9.65)$$

– Коротке замикання джерела ЕРС, тобто (рис. 9.24, в):

$$I_{\max} = \frac{\xi_{дж}}{r} \quad (9.66)$$

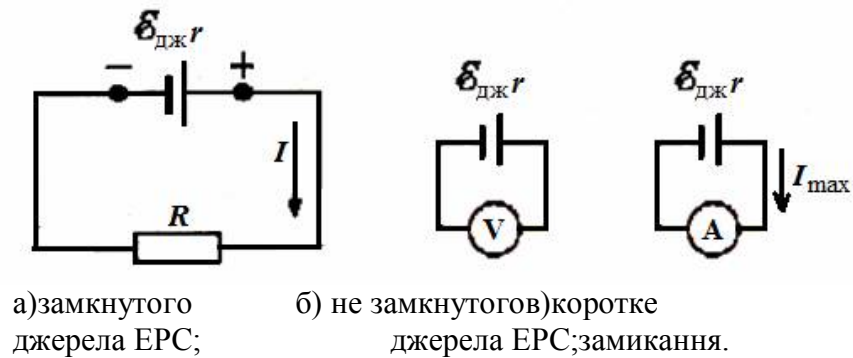


Рис. 9.24 – Закон Ома для повного ланцюга

ККД джерела ЕРС:

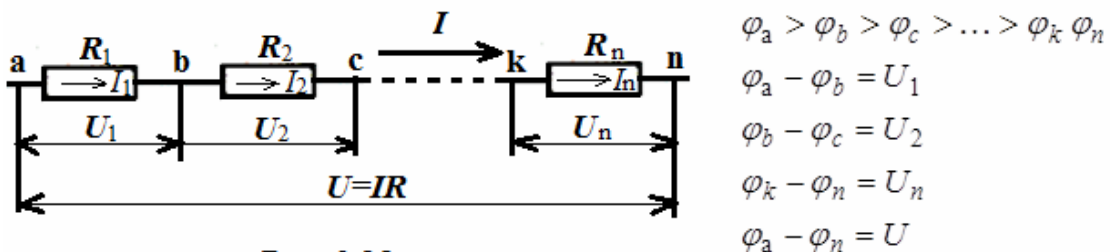
$$\eta = \frac{U}{\xi_{дж}} \quad (9.67)$$

де U – напруга на зовнішній ділянці ланцюга.

9.2.6 Способи з'єднання провідників

На практиці використовуються електричні ланцюги з декількома провідниками, які утворюють різні з'єднання один з одним (послідовне, паралельне, змішане).

Послідовне з'єднання провідників – це таке з'єднання, при якому на будь-якій ділянці ланцюга проходить один і той же струм (рис. 9.25).

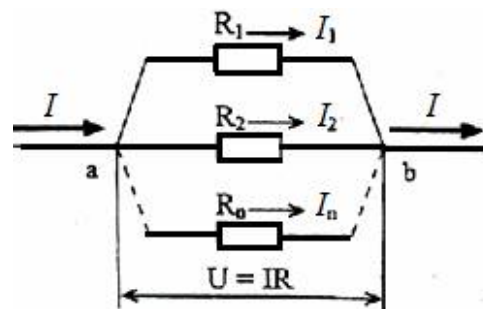


При послідовному з'єднанні провідників електричний ланцюг не має розгалужень.

Таблиця 9.2 – Властивості послідовного з'єднання провідників

| | |
|--|---|
| $I_1 = I_2 = \dots = I_n = I = const$ | – через всі провідники йде однаковий струм; |
| $U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$ $IR = IR_1 + IR_2 + \dots + IR_n$ | – прикладена до кінців ланцюга напруга U розподіляється по всіх провідниках; |
| $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$ $R = \sum_{i=1}^n R_i$ | – еквівалентний опір всього ланцюга дорівнює сумі опорів окремих ділянок ланцюга. |
| $U_1 : U_2 : U_n = R_1 : R_2 : R_n$ | – напруга на кожному з провідників прямо пропорційна їх опорам; |

Паралельне з'єднання провідників – це таке з'єднання, при якому на кожен провідник діє одна і та ж напруга (рис. 9.26).



$$\varphi_a > \varphi_b$$

$$\varphi_a - \varphi_b = U$$

Рис. 9.26– Паралельне з'єднання провідників

Таблиця 9.3 – Властивості паралельного з'єднання провідників

| | |
|---|---|
| $U = IR = I_1 R_1 = I_2 R_2 = \dots$ $\dots = I_n R_n = const$ | – напруга на всіх провідниках (гілках) однакова; |
| $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$ $I = \sum_{i=1}^n I_i$ | – струм в ланцюзі дорівнює сумі струмів в окремих гілках; |

| | |
|---|---|
| $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$ $\frac{1}{R} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \right)$ | – еквівалентний опір всього ланцюга менший, ніж мінімальний опір однієї з гілок; |
| $G = G_1 + G_2 + \dots + G_n$ $G = \sum_{i=1}^n G_i$ | – загальна електропровідність паралельного розгалуження дорівнює сумі електропровідностей його гілок; |
| $I_1 : I_2 : I_n = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_n}$ | – сили струму в окремих гілках розгалуження обернено пропорційні опорам цих гілок. |

Паралельне з'єднання – основний спосіб вмикання в електричний ланцюг різних споживачів.

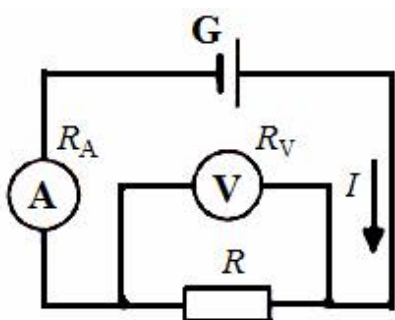


Рис. 9.27

Приладами (амперметр, вольтметр) електровимірювань є провідники зі своїми опорами R_A і R_V . Для виміру сили струму в ланцюзі послідовно вмикають амперметр. Для виміру напруги на ділянці ланцюга R паралельно цій ділянці вмикають вольтметр (рис. 9.27). Щоб вмикання цих приладів істотно не змінювало величину (силу струму, напругу), роблять:

- опір амперметра маленьким $R_A \ll R$;
- опір вольтметра великим $R_V \gg R$.

Розрахунок шунтів і додаткових опорів.

На шкалах приладів позначено максимальне (номінальне) значення сили струму амперметра I_A , допустиме для виміру, і їх внутрішній опір R_A . Якщо потрібно виміряти силу струму $I > I_A$ в n раз, тоді паралельно амперметру вмикають малий опір, який називають шунтом $R_{Ш}$ (рис. 9.28).

Відношення I / I_A називається коефіцієнтом шунтування n ($n = I / I_A$).

Опір шунта обчислюють за формулою

$$R_{Ш} = R_A / (n - 1) \quad (9.68)$$

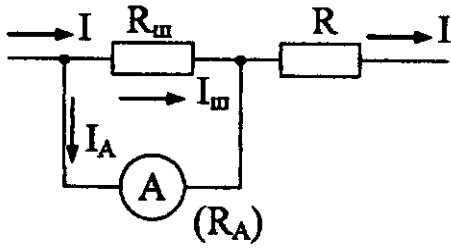


Рис. 9.28

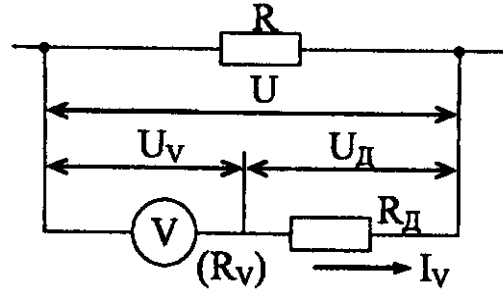


Рис. 9.29

Якщо необхідно виміряти напругу U , яка в k раз більша від напруги U_V , вказаної на шкалі вольтметра, тоді *попередньо* з вольтметром вмикають додатковий опір R_D (рис. 9.29). Відношення U / U_V називається **коефіцієнтом розширення меж виміру вольтметра** ($k = U / U_V$).

Значення додаткового опору обчислюють за формулою

$$R_D = R_V (k - 1) \quad (9.69)$$

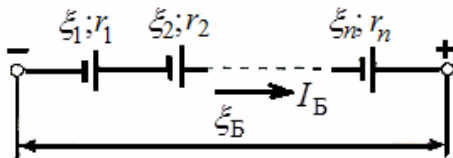
9.2.7 З'єднання джерел електроживлення (джерел ЕРС)

Для здобуття більшої напруги або більшої потужності в зовнішньому ланцюзі декілька джерел електроживлення сполучають в *батареї*. Зазвичай батарею складають з n однорідних (однакових) джерел. Тоді потужність всієї батареї $P_B = I_B \cdot \xi_B$ буде в n разів більша від потужності одного джерела $P_i = I_i \cdot \xi_i$:

$$P_B = nP_i \text{ або } I_B \cdot \xi_B = nI_i \cdot \xi_i. \quad (9.70)$$

На рис. 9.30 показано послідовне з'єднання джерел ЕРС.

- При послідовному з'єднанні елементів в батарею електрорушійна сила батареї дорівнює алгебраїчній сумі ЕДС елементів:



$$\xi_B = \xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_n. \quad (9.71)$$

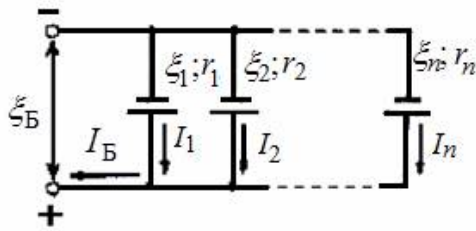
$$P_B = I_i (n \xi_i) \quad (9.72)$$

$$\text{т.е. } \xi_B = n \xi_i, I_B = I_i;$$

$$I = \frac{n \xi_i}{R + n r_i} = \frac{\xi_i}{\frac{R}{n} + r_i} \quad (9.73)$$

На рис. 9.31 показане паралельне з'єднання джерел ЕРС, коли сполучені разом всі однойменні полюси джерел.

- При паралельному з'єднанні елементів з однаковою ЕРС електрорушійна сила батареї дорівнює ЕРС одного елемента:



$$I_B = nI_i, \xi_B = \xi_i; \quad (9.74)$$

$$P_B = I_i(nI_i)\xi_i, \quad (9.75)$$

$$I = \frac{\xi_i}{R + r_i/n} = \frac{n\xi_i}{nR + r_i}. \quad (9.76)$$

Рис. 9.31

9.2.8 Робота і потужність струму. Закон Джоуля-Ленца

Робота ($A_{\text{повн}}$) і потужність ($P_{\text{повн}}$) електричного струму в повному ланцюзі (чисельно дорівнює витраченій джерелом енергії зі створення електричного струму):

$$A_{\text{повн}} = I\xi t, \quad (9.77)$$

$$P_{\text{повн}} = \frac{A_{\text{повн}}}{t} = I\xi = I(U + Ir) = I^2(R + r). \quad (9.78)$$

Корисна робота ($A_{\text{зовн}}$) і потужність ($P_{\text{зовн}}$) електричного струму на зовнішній ділянці ланцюга (на споживачі)

$$A_{\text{зовн}} = IUt = I^2Rt = \frac{U^2t}{R}, \quad (9.79)$$

$$P_{\text{зовн}} = \frac{A}{t} = IU = I^2R = \frac{U^2}{R}, \quad (9.80)$$

$$[P] = 1\text{А} \cdot \text{В} = 1\text{Вт}.$$

Закон Джоуля-Ленца: Кількість теплоти, що виділяється в провіднику із струмом, дорівнює добутку квадрата сили струму, опору провідника та часу проходження по ньому струму:

$$Q = I^2Rt. \quad (9.81)$$

Якщо в провіднику струм виробляє лише теплову дію, то $A = Q$.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) ланцюга

$$\eta = \frac{P_{\text{зовн}}}{P_{\text{повн}}} = \frac{U}{\xi} = \frac{R}{R + r}. \quad (9.82)$$

Контрольні запитання

1. Що таке електричний струм?
2. За яких умов може існувати тривалий електричний струм?
3. Які вільні носії зарядів беруть участь в електричному струмі в металах? У рідинах? У газах?
4. Дайте визначення сили струму як фізичної величини. У яких одиницях вона вимірюється?
5. Що називається густиною струму? У яких одиницях вона вимірюється?
6. Який електричний струм називається постійним?
7. Дайте визначення електричного опору провідника як фізичної величини. У яких одиницях він вимірюється?
8. Від чого залежить опір даного провідника?
9. Яка залежність опору провідника від температури?
10. Що називається електропровідністю провідника та в яких одиницях вона вимірюється?
11. Що таке джерело електроживлення (джерело електрорушійної сили)?
12. Назвіть приклади різних джерел електроживлення.
13. Дайте визначення ЕРС. У яких одиницях вона вимірюється?
14. Назвіть основні характеристики (параметри) джерела електроживлення.
15. Чому дорівнює робота джерела живлення?
16. Що таке електричний ланцюг?
17. Чим відрізняється замкнутий електричний ланцюг від розімкненого?
18. Який електричний ланцюг називається розгалуженим? Нерозгалуженим?
19. Намалюйте схему вмикання амперметра та вольтметра в ланцюг.
20. Чому амперметр вмикають в ланцюг послідовно, а вольтметр паралельно ділянці ланцюга?
21. Сформулюйте закон Ома для металевого провідника (ділянки ланцюга).
22. Що називається напругою (падінням напруги) на ділянці ланцюга?
23. Яке з'єднання провідників називається послідовним? Чому дорівнює еквівалентне з'єднання двох провідників, сполучених послідовно?
24. Яке з'єднання провідників називається паралельним? Як знайти еквівалентний опір двох провідників, сполучених паралельно?
25. Яке з'єднання провідників в ланцюзі дає найменший (мінімальний) опір ланцюгу?
26. Яке з'єднання провідників в ланцюзі дає найбільший (максимальний) опір ланцюгу?
27. Як виміряти струм силоміць 10 А амперметром, розрахованим на 1 А?

28. Що потрібно зробити, аби вольтметром, розрахованим на 1 В, виміряти напругу 110 В?
29. З якою метою декілька джерел живлення сполучають в батарею?
30. Чому дорівнює ЕРС п'яти однакових джерел при їх послідовному з'єднанні? При паралельному з'єднанні?
31. Запишіть три формули для обчислення роботи електричного струму. Як залежить робота від опору?
32. Як підрахувати електричну потужність на даній ділянці ланцюга?
33. На який вигляд енергії перетворюється електрична енергія на ділянці ланцюга, де ввімкнено металевий провідник?
34. Сформулюйте закон Джоуля-Ленца для теплової дії струму.
35. Яка робота і потужність електричного струму в ланцюзі називається корисною?
36. Яка робота і потужність електричного струму в ланцюзі називається повною (або витраченою)?
37. За якою формулою можна обчислити коефіцієнт корисної дії (ККД) ланцюга?
38. Чому ККД електричного ланцюга завжди менший від одиниці?

9.3 Струми провідності

9.3.1 Електричний струм в металах. Контактна різниця потенціалів

Струм в металах – впорядковане переміщення вільних електронів під дією електричного поля

$$I = en\vec{v}S, \quad (9.83)$$

де e – заряд електрона, Кл;

n – концентрація вільних електронів, м^{-3} ;

\vec{v} – швидкість дрейфу електронів, м/с.

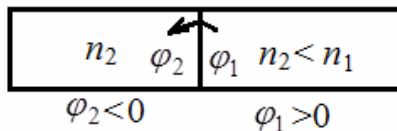


Рис. 9.32

Контактна різниця потенціалів виникає при контакті різних металів (рис. 9.32) і близька до лінійної функції абсолютної температури.

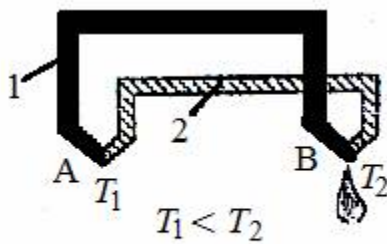


Рис. 9.33

Термопара – ланцюг з двох різних металів (сплавів), в якому виникає термоелектрорушійна сила, прямопропорційна різниці температур ($T_2 - T_1$) в контактах А, В (рис. 9.33):

$$\mathcal{E}_{\text{терм}} = U_{1,2} + U_{2,1}, \quad (9.84)$$

$$I = \frac{\mathcal{E}_{\text{терм}}}{R}. \quad (9.85)$$

Термобатарея – послідовне з'єднання декількох термопар.

9.3.2 Електричний струм в електролітах. Закони електролізу

Електроліти – речовини, розплави або розчини яких проводять електричний струм внаслідок дисоціації на іони.

Прикладом можуть служити розчин солей (NaCl), кислот (CuSO_4), основ (ОН) та розплави (NaOH, MgCl_2), проте самі речовини не проводять струм.

Механізм іонної провідності: під дією електричного поля позитивні іони рухаються до катода (катіони), а негативні – до анода (аніони) і замикають електричний ланцюг. При цьому разом із зарядом переноситься речовина (рис. 9.34).

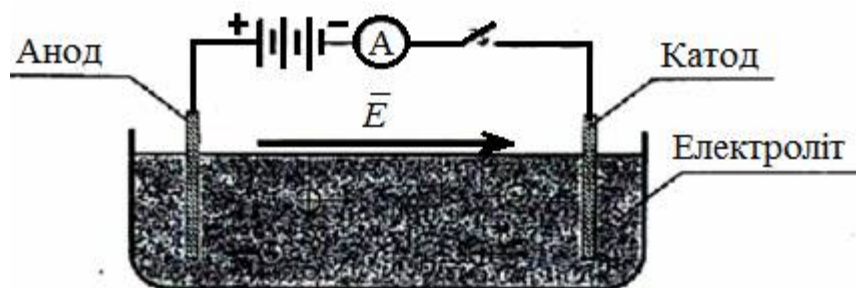


Рис. 9.34

Електроліз – виділення речовини на електродах при проходженні струму крізь електроліт. Електроліз супроводжується окислювально-відновлювальними реакціями.

Закон електролізу (закон Фарадея): маса виділеної на електроді речовини прямо пропорційна заряду, який пройшов крізь електроліт:

$$m = kq, \text{ або } m = kIt, \quad (9.86)$$

оскільки $q = It$, де I – сила постійного струму, що протікає крізь розчин за час t .

Коефіцієнт пропорційності називається **електрохімічним еквівалентом речовини**.

Електрохімічні еквіваленти речовин прямо пропорційні відношенню їх атомних (молярних) мас M до валентності n :

$$k = \frac{M}{neN_A}, \quad (9.87)$$

$$[k] = \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}. \quad (9.88)$$

Величина $F = eN_A$ називається **числом (сталю) Фарадея**.

Стала Фарадея дорівнює електричному заряду, який потрібно пропустити крізь електроліт для виділення на електроді маси будь-якої речовини, рівної в кілограмах відношенню M/n .

Значення числа Фарадея в СІ:

$$eN_A = F; \quad F = 9,648 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}. \quad (9.89)$$

Об'єднаний закон електролізу Фарадея:

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} It, \text{ або } m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} q, \quad (9.90)$$

З об'єднаного закону електролізу визначається електричний заряд q будь-якого іона:

$$q = \pm \frac{nF}{N_A} \quad (9.91)$$

де n – валентність іона, F – стала Фарадея, N_A – число Авогадро.

Заряд одновалентного іона ($n = 1$) рівний за абсолютним значенням заряду електрона:

$$q = e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.} \quad (9.92)$$

Будь-який електричний заряд є кратним елементарному заряду e .

ЕРС поляризації. Металеві електроди дисоціюють в електроліт у вигляді позитивних іонів. При цьому на електродах звільняються електрони. В результаті виникають сторонні сили, протилежні до сторонніх сил джерела струму.

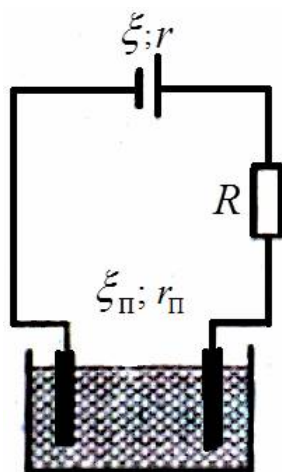


Рис. 9.35

Мірою питомої роботи $(\frac{A_{\text{стор}}}{q})$ сторонніх сил є величина, що називається **ЕРС поляризації** (рис. 9.35):

$$I = \frac{\xi - \xi_{\text{п}}}{R + r_e + r} \quad (9.93)$$

Використання електролізу.

1. Гальванотехніка:

- а) гальваностегія – покриття деталей тонким шаром металу (золочення, никелірування, хромування і т.п.);
- б) гальванопластика – відкладення товстого шару металу, який відшаровується і використовується самостійно (здобуття матриць для друкарських пластинок, барельєф і т.п.).

2. Електрометалургія – виділення чистих металів з природних сумішей (мідь з мідного колчедану, алюмінію з розплавленого бокситу, срібла з відходів фотовиробництва).

3. Очищення металевих деталей (деталь є анодом).

9.3.3 Електричний струм в газах. Газовий розряд. Поняття про плазму

Гази в нормальних умовах є діелектриками. Носії електричного струму в газах можуть виникати лише при іонізації газів – відриві від їх атомів або молекул електронів. При цьому атоми (молекули) газів перетворюються на позитивні іони. Негативні іони в газах можуть виникнути, якщо атоми (молекули) приєднують до себе електрони.

Газовий розряд – проходження електричного струму крізь гази:

Несамостійний газовий розряд – електропровідність газів, зумовлена зовнішніми іонізаторами: сильним нагріванням, ультрафіолетовими і рентгенівськими променями, радіоактивними випромінюваннями, при бомбардуванні атомів (молекул) газів швидкими електронами або іонами.

Самостійний газовий розряд – це газовий розряд, який продовжується після того, як припиняється дія зовнішнього іонізатора. Він підтримується і розвивається за рахунок іонів і електронів, що виникли, головним чином, в результаті ударної іонізації.

Ударною іонізацією (іонізацією електронним або іонним ударом) називається відрив від атома (молекули) газу одного або декількох електронів, спричинений зіткненням з атомами (або молекулами) газу електронів або іонів, що прискорюється електричним полем в розряді. Ударна іонізація одноатомного газу електронами або іонами можлива за виконання умови:

$$\frac{mv^2}{2} \geq A_i \left(1 + \frac{m}{M}\right), \quad (9.94)$$

де m – маса іонізуючої частки, кг;

$\frac{mv^2}{2}$ – кінетична енергія частки, Дж;

A_i – робота іонізації, Дж;

M – маса атома, кг.

Для того, щоб одновалентний іон виробив ударну іонізацію, він повинен пройти в прискорюючому електричному полі більшу різницю потенціалів φ ніж електрон. Це видно з того, що:

$$\frac{mv^2}{2} = e\varphi \text{ та } \frac{m_{\text{іон}}}{M} \gg \frac{m_{\text{ел}}}{M}. \quad (9.95)$$

Несамостійний газовий розряд (рис. 9.36) переходить в самостійний при напрузі U_3 між електродами, що називається **напругою запалення**.

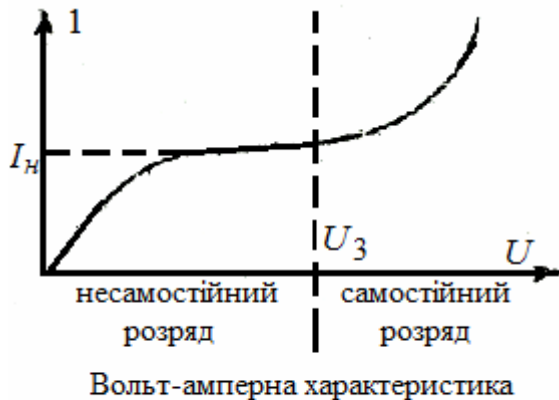


Рис. 9.36

Процес такого переходу називається **електричним пробоем газу**.

Електрична дуга є формою розряду, який виникає при великій густині струму та порівняно невеликій напрузі між електродами.

Вживання електричної дуги: електрозварювання, електрорізка, потужні джерела світла.

Плазма – частково або повністю іонізований газ. Плазма виникає при всіх видах газових розрядів: тліючому, дуговому, іскровому.

іскровому.

У лампах денного освітлення та інших освітлювальних трубках використовують плазму позитивного стовпа тліючого розряду.

Газорозрядну плазму використовують в газових лазерах – квантових джерелах світла.

Найбільш значні перспективи фізики вбачають у використанні високотемпературної плазми (з температурою до десятків мільйонів градусів) в керованих термоядерних реакціях.

Плазмою оточена наша планета. Верхній шар атмосфери на висоті 100 – 300 км є іонізованим газом – **іоносферою**.

У плазмовому стані знаходиться 99 % речовин у Всесвіті.

Блискавка – плазмовий шнур, що замикає наелектризовані хмари або наелектризовану хмару та Землю. Сила струму в блискавці досягає 500 000 А, а різниця потенціалів між хмарою та Землею – 100 000 000 В.

9.3.4 Електричний струм у вакуумі (струм перенесення)

Вакуум – газ, розріджений до такої міри, що середня довжина вільного пробігу молекул перевищує лінійні розміри посудини.

У вакуумі практично відсутні вільні носії заряду.

Струм у вакуумі можливий лише за рахунок заряджених частинок, що виникають при емісійних явищах.

Термоелектронна емісія – випускання електронів твердими і рідкими тілами при їх нагріванні. Вилітають електрони, кінетична енергія яких більша або дорівнює роботі виходу їх з металу (роботі з подолання зв'язків електрона з металом) (рис. 9.37).

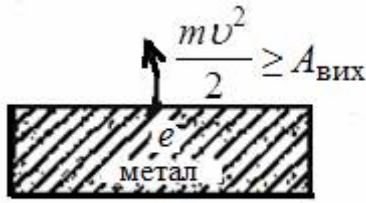


Рис. 9.37

Фотоелектронна емісія – виривання електронів з поверхні тіла під дією світла.

Вторинна емісія – вибивання електронів з металів у вакуумі при його бомбардуванні зарядженими частинками.

Електронні лампи – це пристрої, основані на використанні явища термоелектронної емісії.

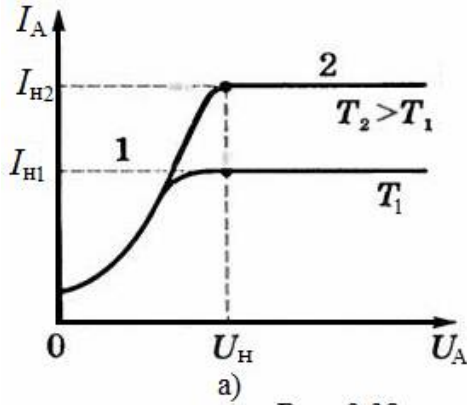
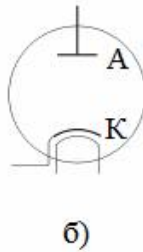


Рис. 9.38



Простим типом електронних ламп є двоелектродна лампа – **діод прямого напруження**, який зображається схематично, як показано на рис. 9.38 б, якщо анод лампи (А) приєднати до позитивного полюса джерела постійного струму, а катод (К) – до негативного, то в ланцюзі лампи встановлюється постійний термоелектронний струм I_A .

Вольт-амперна характеристика діода прямого напруження (рис. 9.38, а). Струм насичення I_n досягається тоді, коли всі термоелектрони переносяться від катода до анода.

Отже, вакуумний **діод** має односторонню провідність, що дозволяє використовувати його як випрямляч.

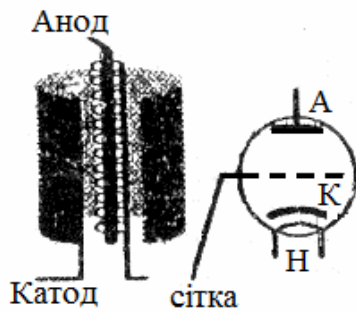


Рис. 9.39

У триелектродних вакуумних лампах (тріод-пентодах) міститься ще один електрод (сітка, електрод, що управляє). Зміна різниці потенціалів між сіткою та катодом приводить до зміни струму через лампу. Подаючи «на вхід» лампи (катод-сітка) слабкий змінний електричний сигнал, отримують «на виході» (катод-анод) посилений сигнал такої ж форми як у вхідного сигналу.

Вакуумний тріод-пентод завдяки наявності сітки може використовуватися в ролі підсилювача.

9.3.5. Електричний струм в напівпровідниках

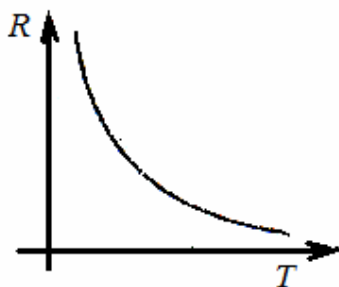


Рис. 9.40

Напівпровідники (Ge, Si та ін.) – речовини, які за провідністю знаходяться між провідниками та діелектриками. На відміну

від провідників (металів) опір напівпровідників різко зростає при зниженні температури (рис. 9.40).

Типи напівпровідників.

Чисті напівпровідники (кремній, германій) мають власну електронну провідність, яка виникає в результаті розриву ковалентного зв'язку в кристалах і появи вільних електронів.

Розрив ковалентного зв'язку може спричинятись:

- а) нагріванням – терморезистори, термометри, термореле;
- б) освітленням – люксметри, фотореле;
- в) дією сильних електричних полів.

Існує два механізми власної провідності – *електронна* і *діркова*.

Електронна провідність здійснюється направленим переміщенням в міжатомному просторі вільних електронів, які покинули валентну оболонку атома в результаті нагрівання напівпровідника або під дією зовнішніх полів.

Вакантний електронний стан в атомі, що утворилося при виникненні вільного електрона, має позитивний заряд і називається *діркою*. Валентний електрон сусіднього атома, притягуючись до дірки, може перескочити на неї (*рекомбінувати*). При цьому на її колишньому місці утворюється нова дірка, яка потім може аналогічно переміщатися по кристалу.

Діркова провідність здійснюється при направленому переміщенні валентних електронів між електронними оболонками сусідніх атомів на вакантні місця (дірки).

Власна провідність напівпровідників зазвичай невелика, оскільки мале число вільних зарядів.

Донорні і акцепторні домішки.

Домішки в напівпровіднику – атоми сторонніх хімічних елементів, що містяться в основному напівпровіднику.

Дозоване введення в чистий напівпровідник домішок дозволяє цілепрямовано змінювати його провідність.

Домішкова провідність – провідність напівпровідників, зумовлена внесенням до їх кристалічних ґрат домішок.

Змінюючи концентрацію атомів домішки, можна значно змінити число носіїв заряду того або іншого знаку.

Знак носіїв заряду визначається валентністю атомів домішки. Розрізняють *донорні* (від лат. donor – дарувати) і *акцепторні* (від лат. acceptor – приймати) *домішки*. Валентність атомів донорної домішки більша, ніж валентність основного напівпровідника. Валентність атомів акцепторної домішки менша від валентності основного напівпровідника.

Напівпровідник з акцепторною домішкою називають *напівпровідником p-типа* (від лат. positivus – позитивний), оскільки дірка має позитивний заряд.

Напівпровідник з донорною домішкою називають *напівпровідником n-типу* (від лат. negativus – негативний), оскільки він має переважно електронну провідність.

У місці контакту домішкових напівпровідників утворюється особливий шар: ***p-n-перехід***.

Характерною особливістю *p-n-переходу* є його однобічна провідність: він пропускає струм практично лише в одному напрямі (від напівпровідника *p*-типу до напівпровідника *n*-типу).

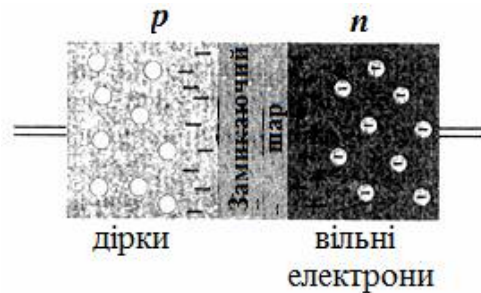


Рис. 9.43 – Полярність напруги

Таким чином, в *p-n-переході* утворюється ***замикаючий шар-подвійний шар різнойменних електричних зарядів***, який створює електричне поле на *p-n-переході* (рис. 9.43), що перешкоджає вільному розділенню зарядів.

Напруженість поля цього замикаючого шару напрямлена від *n*- до *p*-напівпровідника (від плюса до мінуса).

Здатність *p-n-переходу* пропускати струм практично лише в одному напрямі використовується для перетворення (за допомогою діода) змінного струму, який змінює свій напрям, на постійний (точніше пульсуючий) струм одного напрямку.

Напівпровідниковий діод. Випрямлення змінного струму.

Для перетворення змінного струму на постійний в електронних системах використовується *напівпровідниковий діод*.

Напівпровідниковий діод – елемент електричної системи, який містить *p-n-перехід* і два виводи для ввімкнення в електричний ланцюг.



Рис. 9.44

На електричних схемах напівпровідниковий діод зображається символом (рис. 9.44), в якому напрям стрілки відповідає напрямку прямого струму через діод (від *p*- до *n*-напівпровідника).

Різниця потенціалів на замикаючому шарі з германію виявляється порядку $U_3 = 0,3 \text{ В}$.

В деякому розумінні замикаючий шар аналогічний зарядженому конденсатору.

Додаток до p - n -переходу напруги протилежної полярності – *пряме ввімкнення*: плюс – до p -напівпровідника і мінус – до напівпровідника n -типу, послаблює замикаюче поле. При цьому на контакті знову виникає рух зарядів електронів з n - в p -область, а дірок – з p - в n -область. При прямому ввімкненні p - n -переходу в ланцюг до джерел напруги електричний струм протікає в прямому напрямі: з p - в n -область. Чим більша прикладена напруга, тим більша сила струму. Сила струму через p - n -перехід різко зростає, коли прикладена різниця потенціалів перевершує напругу на замикаючому шарі, тобто при $U > U_3$.

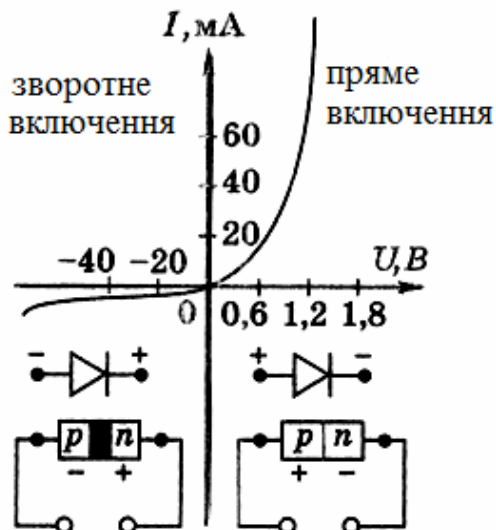
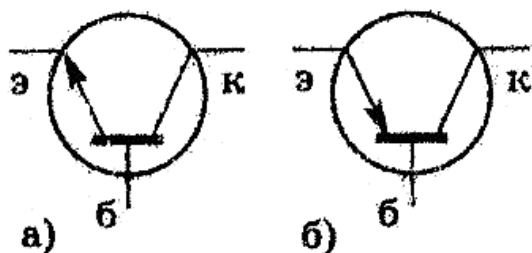


Рис. 9.45 Вольт-амперна характеристика p - n -переходу

Зворотне увімкнення p - n -переходу, коли плюс зовнішнього джерела напруги доп-провідника, а мінус – до p -напівпровідника, збільшує те, що замикає напруга. Збільшення замикаючої напруги блокує рух основних носіїв струму (заряджених частинок, що мають максимальну концентрацію) – електронів з n -області і дірок з p -області. Тому незначний струм в p - n -переході може протікати лише внаслідок руху неосновних носіїв (заряджених частинок, концентрація яких значно менша від концентрації основних носіїв) – вільних електронів з p -області і дірок з n -області. Невелика концентрація неосновних носіїв приводить до того, що при зворотному ввімкненні струм через p - n -перехід виявляється нехтовно малим.

Залежність сили струму через p - n -перехід від напруги, прикладеної до нього, або вольт-амперна характеристика p - n -переходу наведена на рис. 9.45.

Транзистор – це пристрій з трьох напівпровідникових кристалів з домішковою провідністю. У транзисторах різного типу чергування кристалів різне: n - p - n або p - n - p (рис. 9.46, а, б).



Транзистори в основному використовують для генерування і посилення радіосигналів. Транзистор (n - p - n) за принципом дії подібний до вакуумного триод-пентода (рис. 9.47, а, б).

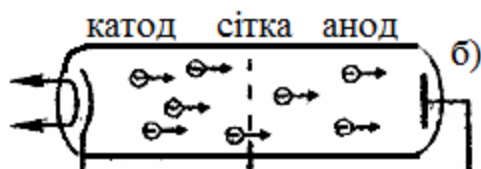
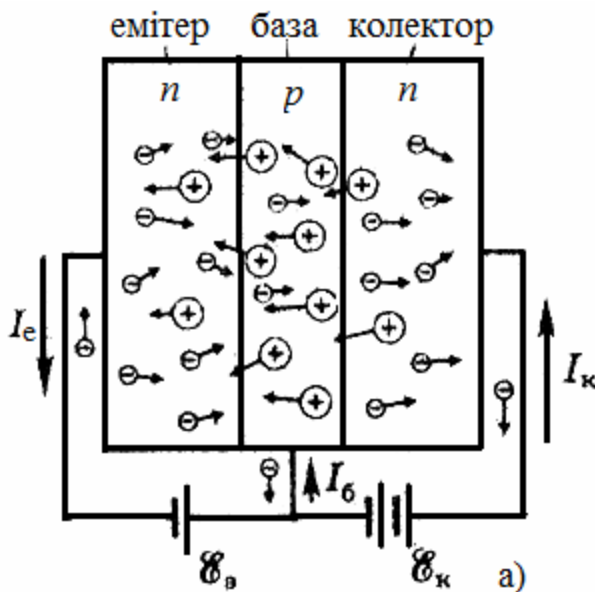
Лівий n -кристал за своєю роллю схожий на катод вакуумного триод-пентода і називається *емітером*;

- а) (*n-p-n*)-транзистора правий *n*-кристалл подібний до анода і називається **колектором**;
- б) (*p-n-p*)-транзистора *p*-кристалл подібний до сітки і називається **базою**.

Рис. 9.46

Змінюючи різницю потенціалів між емітером і базою (подаючи на них $U_{вх}$, що змінюється), можна керувати колекторним струмом.

Транзистори (*p-n-p*) також використовуються в багатьох схемах, але пояснення принципу їх дії складніше (доводиться говорити про емісію дірок, а не електронів).



а) транзистор б) триод

Рис. 9.47

Достоїнства напівпровідникового діода і тріод-пентода: малі розміри, великі механічна міцність і довговічність, невисока робоча напруга.

Недолік – залежність електричних характеристик від температури довкілля.

Контрольні запитання:

1. Які вільні носії беруть участь в електричному струмі в твердих тілах? У рідинах? У газах?
2. Від чого залежить струм в металах?
3. Коли виникає контактна різниця потенціалів? Що таке термопара?
4. Що називається електролітом?
5. Який процес називається електролізом?
6. Як виникають носії струму в рідинах?
7. Від чого залежить опір електроліту?
8. Сформулюйте перший і другий закони Фарадея.
9. Чому дорівнює число Фарадея?
10. Які вільні носії беруть участь в електричному струмі в газі?
11. Який процес називається рекомбінацією іонів?
12. Коли з'являється струм насичення в газі?
13. Який розряд називається несамостійним? Самостійним?
14. Що таке плазма?
15. Опишіть явище термоелектронної емісії.
16. Як можна збільшити струм насичення при термоелектронній емісії?
17. Опишіть пристрій термоелектронної лампи.
18. Які властивості мають катодні промені?
19. Опишіть пристрій електроннопроменевої трубки.
20. Опишіть принцип роботи і властивості чистих напівпровідників.
21. Опишіть принцип роботи і властивості домішкових провідників.
22. Чому діод має односторонню провідність?
23. Накресліть схему тріод-пентода.

10 ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

10.1 Магнітне поле. Магнітна індукція

Магнітне поле – це вид матерії, основною особливістю якої є силова дія на рухомі тіла або частинки, що мають електричний заряд, і на частинки, що мають магнітний момент.

Магнітне поле:

- 1) визначає магнітну взаємодію, яка виникає:
 - між двома струмами;
 - між струмом і рухомим зарядом;
 - між двома рухомими зарядами.
- 2) створюється:
 - струмами;
 - магнітами;
 - рухомими зарядами.
- 3) впливає на внесені до нього:
 - струми;
 - магніти;
 - рухомі заряди.

Магнітна індукція (\vec{B}) – це векторна фізична величина, яка визначає силові властивості магнітного поля.

Напрямок вектора \vec{B} в кожній точці магнітного поля збігається:

- з напрямом осі (S-N) магнітної стрілки (рис. 10.1, а);
- з нормаллю \vec{n} до витка із струмом (рис. 10.1, б).

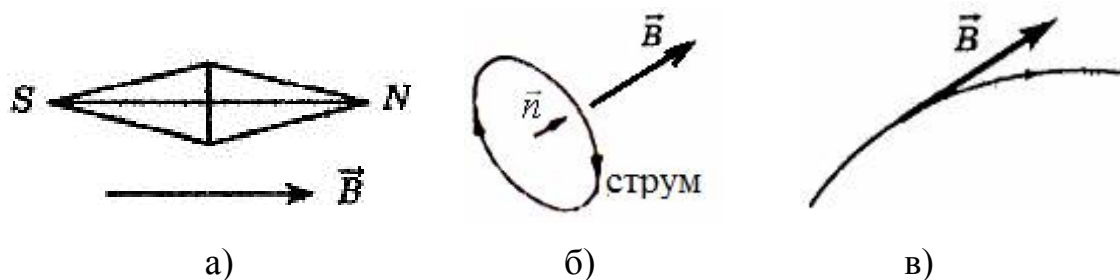


Рис. 10.1

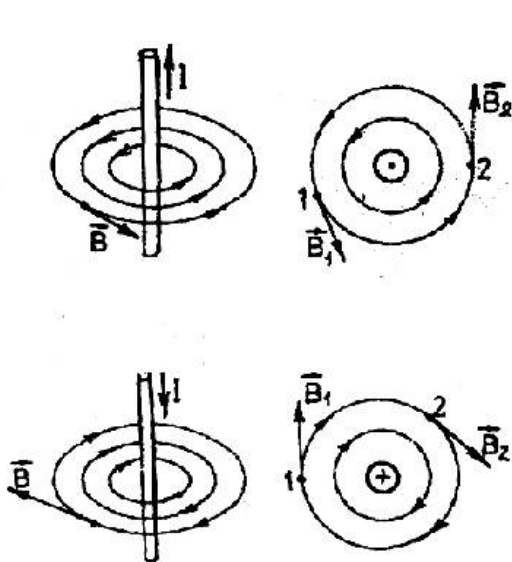
Магнітне поле графічно зображається лініями магнітної індукції (магнітними силовими лініями).

Лінії магнітної індукції – безперервні лінії, дотичні до яких в кожній точці збігаються за напрямом з вектором магнітної індукції. Ці лінії завжди замкнуті, оскільки магнітне поле вихрове (рис. 10.1, в).

10.1.1 Магнітна індукція прямого, кругового струму і соленоїда

Магнітна індукція визначається за законом Біо-Савара-Лапласа.

Магнітна індукція прямолінійного незкінченної довжини провідника із струмом (рис. 10.2):



$$B = \mu \mu_0 \frac{I}{2\pi r} \quad (10.1)$$

r – відстань від провідника до точки, в якій визначається індукція.

Тут μ_0 – магнітна стала (коефіцієнт):

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}, \quad (10.2)$$

μ – магнітна проникність середовища – число, що визначає, в скільки разів магнітна індукція поля в середовищі більша (або менша) від магнітної індукції поля у вакуумі:

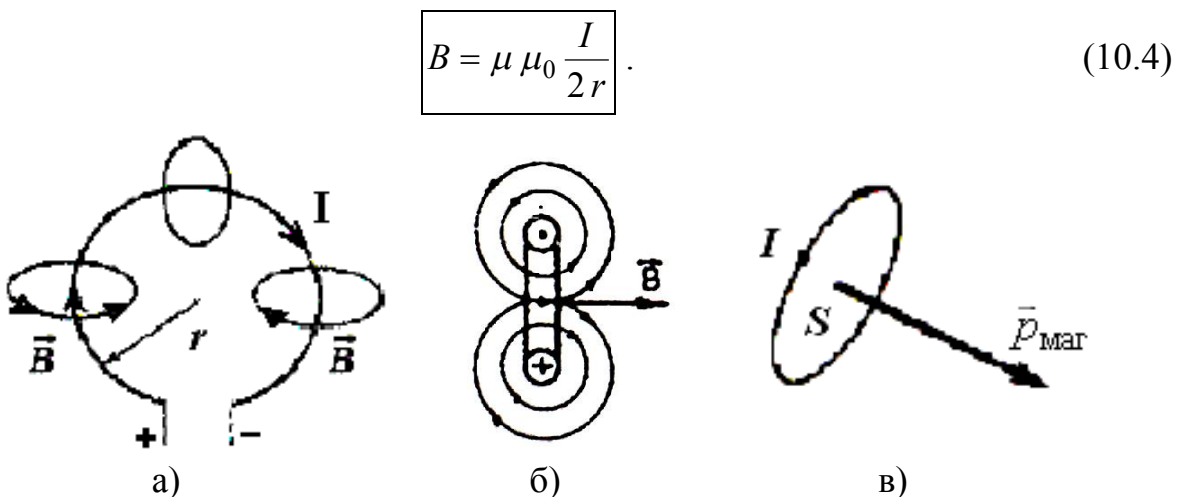
Рис. 10.2

$$\mu = \frac{B}{B_0} \quad (10.3)$$

μ – безрозмірна величина.

Магнітне поле кругового струму.

В центрі витка магнітна індукція:



$$B = \mu \mu_0 \frac{I}{2r} \quad (10.4)$$

Рис. 10.3

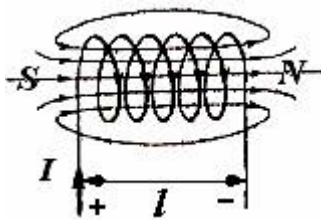
Лінії магнітної індукції замкнуті в площині, перпендикулярній до струму (рис. 10.3, а-б).

Напрямок ліній магнітної індукції **визначається правилом гвинта (правої руки)**: якщо відігнутий великий палець правої руки спрямований у напрямі струму, то зігнуті чотири пальці вказують напрям ліній магнітної індукції.

Магнітний момент ($\vec{p}_{\text{маг}}$) кругового струму – це вектор, модуль якого спрямований перпендикулярно до площини кругового струму за правилом гвинта (рис. 10.3, в):

$$p_{\text{маг}} = I \cdot S \quad (10.5)$$

Магнітне поле соленоїда (котушки провідника з постійним струмом) (рис. 10.4).



Якщо довжина (l) соленоїда значно перевищує його діаметр, магнітне поле в його середній частині практично однорідне і його модуль визначається

$$B = \mu \mu_0 \frac{IN}{l}, \quad (10.6)$$

Рис. 10.4

де N – число витків.

10.1.2 Дія магнітного поля на провідник зі струмом

Закон Ампера: Сила, з якою магнітне поле діє на поміщений в нього відрізок провідника зі струмом, дорівнює добутку сили струму, модуля вектора магнітної індукції, довжини відрізка провідника і синуса кута між напрямками струму і магнітної індукції (рис. 10.5):

$$F_A = IB\Delta l \sin \alpha, \quad (10.7)$$

де $\alpha = \left(\vec{I}, \vec{B} \right)$.

Сила \vec{F} спрямована перпендикулярно до індукції магнітного поля і відрізка провідника із струмом. **Напрямок цієї сили за законом Ампера визначають за правилом лівої руки**: якщо ліву руку розташувати так, що чотири витягнуті пальці вказують напрям струму в провіднику, а вектор магнітної індукції входить в долоню, то відігнутий (у площині долоні) на 90° великий палець вказує напрям сили, що діє на відрізок провідника (рис. 10.6,а).

Модуль вектора магнітної індукції. Максимальна сила $F_{A\max}$ діє на відрізок провідника, розташований перпендикулярно до вектора магнітної індукції, оскільки $\sin \alpha = 1$ при $\alpha = 90^\circ$ (рис. 10.6, б):

$$F_{A\max} = IB\Delta l \quad (10.8)$$

З цієї формули можна знайти модуль вектора магнітної індукції.

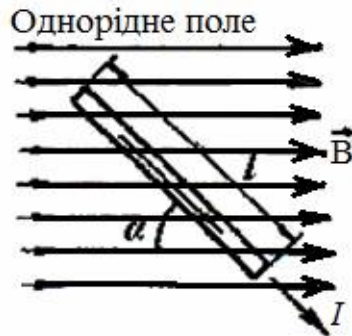


Рис. 10.5

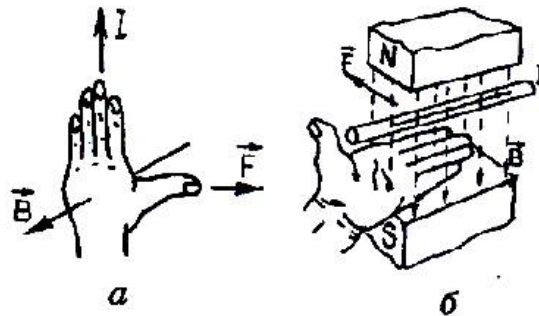


Рис. 10.6

Модуль вектора магнітної індукції— фізична величина, яка дорівнює відношенню модуля максимальної сили, що діє з боку магнітного поля на відрізок провідника зі струмом, до сили струму та довжини відрізка провідника:

$$B = \frac{F_{A\max}}{I\Delta l} \quad (10.9)$$

Одиниця магнітної індукції чисельно дорівнює максимальній силі, яка діє на відрізок провідника довжиною 1 м при силі струму в ньому 1 А.

$$[B] = 1 \text{ Н} / (\text{А} \cdot \text{м}) = 1 \text{ Тл (тесла)} \quad (10.10)$$

10.1.3 Закон взаємодії паралельних струмів

Принцип суперпозиції магнітних полів: магнітні поля не взаємодіють, а лише накладаються:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n \quad (10.11)$$

Струми взаємодіють, оскільки магнітне поле одного струму діє на інший струм і навпаки.

Взаємодія паралельних струмів нескінченної довжини:

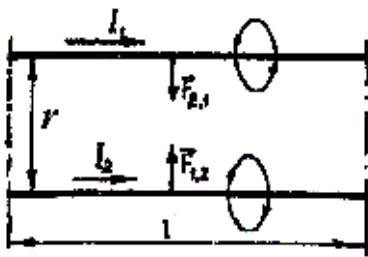


Рис. 10.7

Модуль сили, що діє на провідник довжиною l на відстані r (рис. 10.7)

$$F_{12} = F_{21} = \mu \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi r} l \quad (10.12)$$

Сила ампера до одиниці довжини провідника:

$$\frac{F}{l} = \mu \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi r} \quad (10.13)$$

При взаємодії у вакуумі $\mu = 1$:

$$\frac{F_A}{l} = \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi r} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{I_1 I_2}{2\pi r} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I_1 I_2}{r}$$

Одиниця сили струму. Формула (10.13) дозволяє визначити одиницю сили струму – ампер (1 А). Разом з кілограмом, метром, секундою **ампер** відноситься до основних величин СІ, через які визначаються інші фізичні величини.

1 А – сила постійного струму, який, протікаючи по двох паралельних провідниках нескінченної довжини і нехтовно малої площі кругового поперечного перерізу, розташованих у вакуумі на відстані 1 м один від одного, зумовлює на кожному відрізку провідника довжиною 1 м силу взаємодії, яка дорівнює $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

Магнітне поле другого струму

$$B_2 = \mu \mu_0 \frac{I_2}{2\pi r} \quad (10.14)$$

діє на перший струм з силою Ампера:

$$F_{21} = B_2 I_1 l \quad (10.15)$$

Магнітне поле першого струму

$$B_1 = \mu \mu_0 \frac{I_1}{2\pi r} \quad (10.16)$$

діє на другий струм з силою Ампера

$$F_{12} = B_1 I_2 I_1 l . \quad (10.17)$$

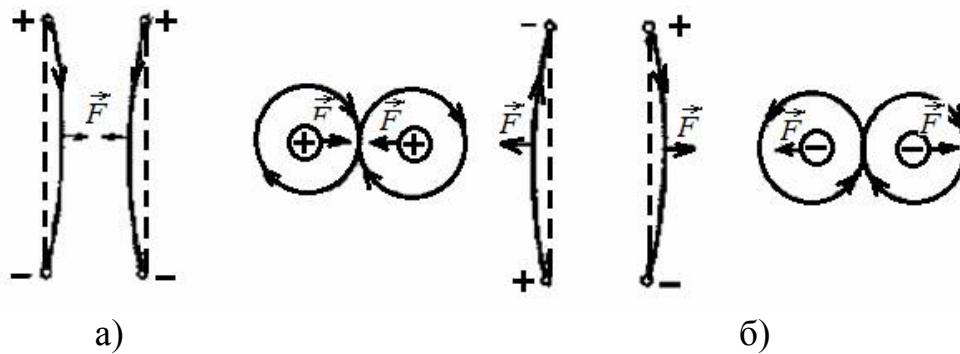


Рис. 10.8

Провідники, по яких паралельні струми йдуть в одному напрямі, притягуються (рис. 10.8, а), а якщо в протилежному – відштовхуються (рис. 10.8, б).

10.1.4 Дія магнітного поля на рухомий заряд (сила Лоренца)

Електричний заряд може рухатися в просторі з швидкістю \vec{v} або під дією кулонівської сили електричного поля, або разом з провідником.

Якщо рухомий заряд q помістити в магнітне поле з індукцією B , то на нього діятиме ще сила, яка називається силою Лоренца (рис. 10.9).

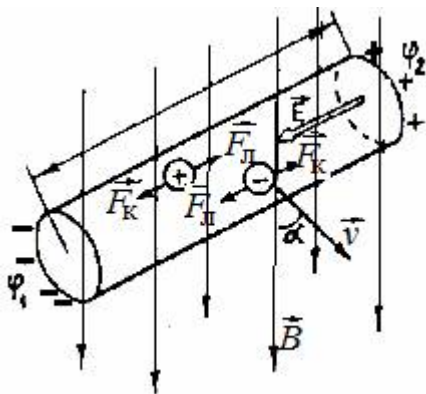


Рис. 10.9

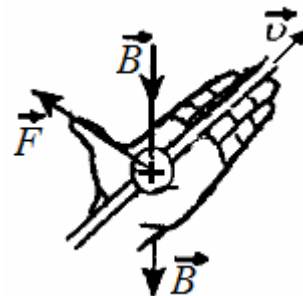


Рис. 10.10

Напрямок сили Лоренца визначається мнемонічним правилом лівої руки: якщо ліву руку розташувати так, щоб лінії \vec{B} були направлені в долонь, чотири пальці вказували напрям руху позитивного заряду, то відігнутий великий палець вказує напрям сили Лоренца (рис. 10.10). Якщо рухається від'ємний заряд, то чотири пальці напрямлено назустріч його руху.

Модуль сили Лоренца дорівнює:

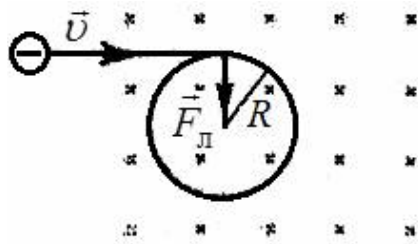
$$F_{\text{л}} = Bq v \sin \alpha, \quad (10.18)$$

де α – кут між \vec{B} і \vec{v} .

$$F_{\text{л,max}} = Bq v. \quad (10.19)$$

$\vec{F}_{\text{л}}$ направлена перпендикулярно до швидкості руху заряду \vec{v} , тому:

- надає зарядженій частинці доцентрове прискорення;
- робота $\vec{F}_{\text{л}}$ дорівнює нулю.



Якщо $\vec{v} \perp \vec{B}$, $\alpha = 90^\circ$ заряджена частинка рухається по колу певного радіуса (рис. 10.11):

$$R = \frac{m v}{q B} \begin{cases} F_{\text{л}} = m \frac{v^2}{R} \\ F_{\text{л}} = Bq v \end{cases}. \quad (10.20)$$

Рис. 10.11 Якщо \vec{v} напрямлена під кутом α до \vec{B} , ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$) то відповідно

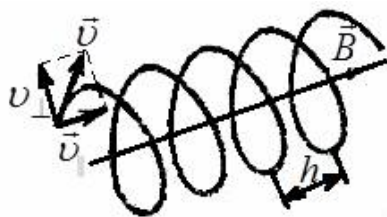


Рис. 10.12

перпендикулярною складовою швидкості v_{\perp} , частка описує коло радіусом R , а відповідно паралельній складовій v_{\parallel} – рухається вперед $v_{\parallel} \cdot T = h$, тобто в результаті рухається по спіралі з кроком h (рис. 10.12).

Якщо заряджена частинка влітає в магнітне поле паралельно лініям магнітної індукції: $\vec{v}_{\parallel} \uparrow \uparrow \vec{B}$, $\alpha = 0$, $\sin \alpha = 0$, тоді $F_{\text{л}} = 0$. При відсутності сили Лоренца частинка (згідно з принципом інерції) продовжуватиме рухатися рівномірно та прямолінійно з початковою швидкістю вздовж ліній магнітної індукції.

Заряджена частинка, яка влітає в однорідне магнітне поле паралельно лініям магнітної індукції, рухається рівномірно вздовж цих ліній.

10.1.5 Магнітний потік

Енергетичною характеристикою магнітного поля є магнітний потік (або потік магнітної індукції).

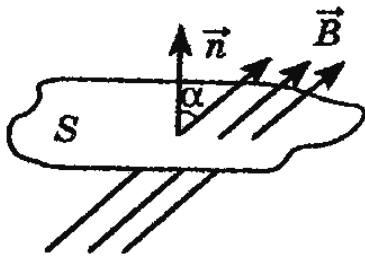


Рис. 10.13

Магнітним потоком Φ крізь поверхню з площею S називається скалярна величина, яка дорівнює добутку модуля вектора магнітної індукції B на площу S і косинус кута α між напрямом вектора \vec{B} і нормаллю \vec{n} до поверхні (рис. 10.13).

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha = B \cdot S_{\perp} . \quad (10.21)$$

За одиницю вимірювання магнітного потоку береться **вебер** (Вб):

$$[\Phi] = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2 = 1 \text{ Вб (вебер)} . \quad (10.22)$$

Якщо вектор магнітної індукції \vec{B} визначає силу на елемент струму в кожній точці простору, то магнітний потік Φ характеризує роботу, яка здійснюється при русі провідника із струмом (рис. 10.14, а) або контура із струмом (рис. 10.14, б) в магнітному полі:

$$A = F \cdot \Delta r = I \cdot B \cdot l \cdot \Delta r = I \cdot B \cdot \Delta S = I \cdot \Delta \Phi , \quad (10.23)$$

де $\Delta \Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ – зміна магнітного потоку (або різниця потоків крізь контур від початку до кінця руху відповідно).

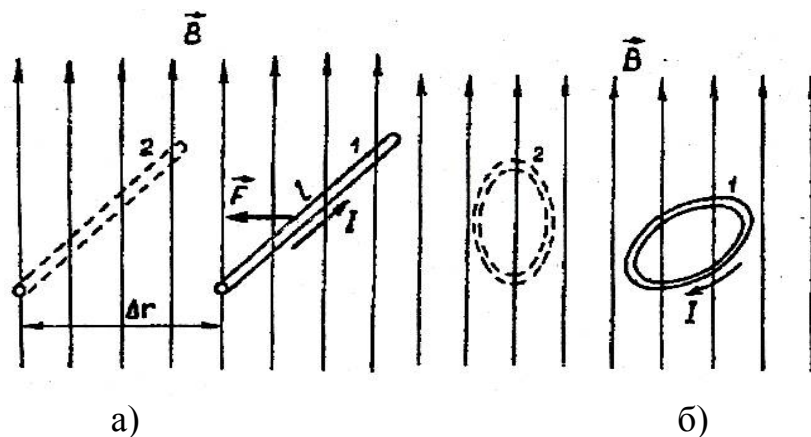
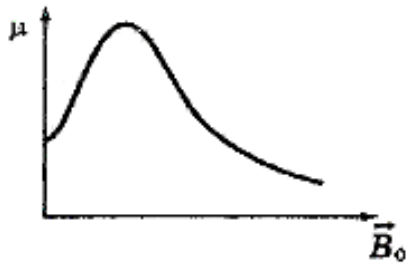


Рис. 10.14

10.1.6 Магнітне поле в речовині

Магнетики – всі речовини, здатні намагнічуватися в зовнішньому магнітному полі (\vec{B}_0), тобто створювати власні (внутрішні) магнітні поля \vec{B}_c самої речовини:



$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_c. \quad (10.24)$$

Діамагнетик – речовина, в якій вектор індукції власного магнітного поля, напрямлений протилежно вектору магнітної індукції зовнішнього (що намагнічує) поля, значно менший від нього за модулем:

Рис. 10.15

$$\vec{B}_c \uparrow\downarrow \vec{B}_0, \quad B_c \ll B_0. \quad (10.25)$$

Діамагнетиками є багато газів (водень, гелій, азот, двоокис вуглецю), плазма, метали (золото, срібло, мідь), скло, вода, сіль, гума, алмаз, дерево, пластики та ін.

Парамагнетик – речовина, в якій вектор індукції власного магнітного поля співпадає за напрямом з вектором магнітної індукції зовнішнього (що намагнічує) поля, менший від нього за модулем:

$$\vec{B}_c \uparrow\uparrow \vec{B}_0, \quad B_c < B_0. \quad (10.26)$$

Парамагнетиками є кисень, алюміній, платина, уран, лужні та лужноземельні метали.

Феромагнетик – речовина, в якій вектор індукції власного магнітного поля співпадає за напрямом з вектором магнітної індукції зовнішнього (що намагнічує) поля, значно перевищує його за модулем:

$$\vec{B}_c \uparrow\uparrow \vec{B}_0, \quad B_c \gg B_0. \quad (10.27)$$

Феромагнетиками є залізо, кобальт, нікель, їх сплави, рідкоземельні елементи.

Магнітна проникність середовища (рис. 10.15) – фізична величина, яка показує, в скільки разів індукція магнітного поля в однорідному середовищі відрізняється від магнітної індукції зовнішнього (що намагнічує) поля у вакуумі:

$$\mu = \frac{B}{B_0}. \quad (10.28)$$

У діамагнетику зовнішнє магнітне поле трохи послаблюється, так що $\mu \leq 1$ (наприклад, для золота $\mu = 0,999961$).

У парамагнетику зовнішнє магнітне поле трохи посилюється, так що $\mu \geq 1$ (наприклад, для платини $\mu = 1,00025$).

У феромагнетику зовнішнє магнітне поле значно посилюється (наприклад, для чистого заліза $\mu \approx 10^4$).

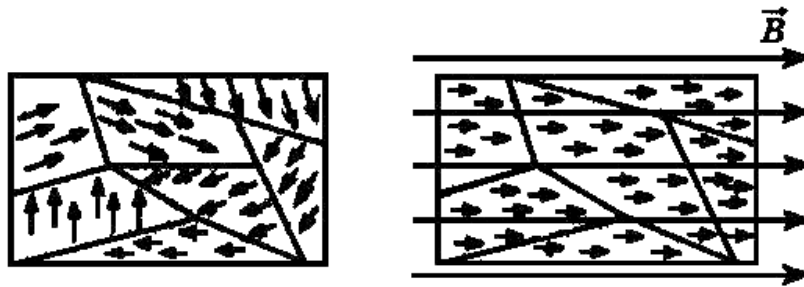


Рис. 10.16

Гіпотеза Ампера: магнітні властивості тіла визначаються мікроскопічними електричними струмами всередині речовини. Якщо струми спрямовані назустріч, тоді створювані цими струмами магнітні поля компенсують один одного. У зовнішньому магнітному полі встановлюється порядок цих струмів – речовина намагнічується (рис. 10.16).

10.2 Електромагнітна індукція

Електромагнітна індукція відкрита М. Фарадеєм, подалі досліджувалась Д. Максвеллом.

10.2.1 Явище електромагнітної індукції

Якщо, наприклад, провідник рухається з швидкістю \vec{v} в однорідному магнітному полі (рис. 10.17), то вільні заряди під дією сили Лоренца переміщуються до кінців провідника й утворюють різницю потенціалів $\varphi_2 - \varphi_1$. Це явище називається *електромагнітною індукцією*.

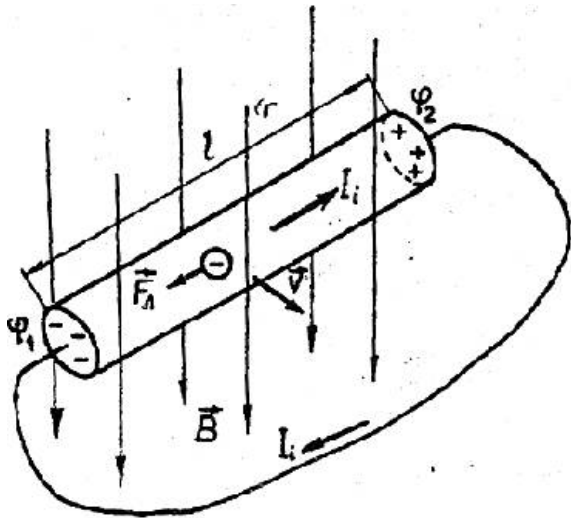


Рис. 10.17

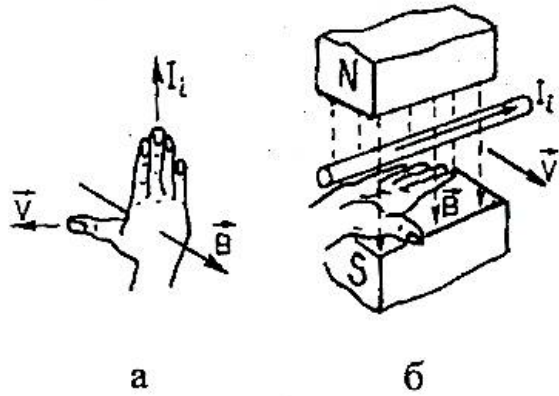


Рис. 10.18

Таким чином, рухомий в магнітному полі провідник стає джерелом ЕРС. Модуль ЕРС електромагнітної індукції при незмінних B і l залежить від швидкості руху провідника і синуса кута α між напрямками векторів \vec{B} і \vec{v} :

$$\boxed{\varepsilon_i = B \cdot l \cdot v \cdot \sin \alpha} \quad (10.29)$$

Електромагнітна індукція – це явище виникнення електрорушійної сили індукції в провіднику, контур якого перетинається магнітним потоком, що змінюється:

$$\varepsilon_i = \frac{A_{\text{стоп}}}{q} \quad (10.30)$$

Якщо провідник замкнений, то відповідно до ЕРС індукції виникає індукційний струм:

$$I_i = \frac{\varepsilon_i}{R} \quad (10.31)$$

Напрямок індукційного струму (і ЕРС теж) визначають за правилом правої руки (рис. 10.18, а-б).

Правило правої руки: якщо праву руку розташувати так, щоб лінії магнітної індукції були напрямлені в долоню, відігнутий великий палець вказував напрям швидкості руху провідника, то чотири витягнуті пальці вкажуть напрям індукційного струму.

Явище електромагнітної індукції описує **закон Фарадея**:

ЕРС електромагнітної індукції в контурі прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку через площу контура (основний закон електромагнітної індукції).

$$\boxed{\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}} \quad (10.32)$$

Знак мінус у формулі пояснюється **правилом Ленца**:

ЕДС ε_i створює в замкнутому контурі індукційний струм I_i такого напрямку, що його власне магнітне поле B_i протидіє зміні зовнішнього магнітного потоку, який спричиняє цей індукційний струм (рис. 10.19).

Якщо число провідників буде N , то ЕРС індукції буде в N разів більша

$$\varepsilon_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (10.33)$$

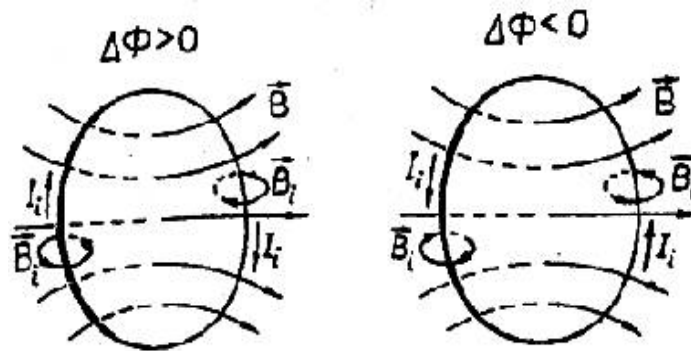


Рис. 10.19

10.2.2 Самоіндукція. Індуктивність. Взаємна індукція. Енергія магнітного поля

***Самоіндукція** – це явище виникнення електрорушійної сили індукції в провіднику при зміні сили струму в ньому самому.*

Якщо в провіднику сила струму збільшується, то магнітний потік довкола провідника зростає. Тому виникає вихрове електричне поле, яке протидіє зростанню струму, відповідно здійснюючи при цьому роботу. Це означає виникнення ЕРС індукції, протилежної за знаком ЕРС джерела.

Якщо в провіднику сила струму зменшується, виникає ЕРС індукції, яка співпадає за знаком з ЕРС джерела.

Закон самоіндукції:

$$\boxed{\varepsilon_{c.i.} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}} \quad (10.34)$$

$$\Delta I > 0 \Rightarrow \varepsilon < 0, \quad \Delta I < 0 \Rightarrow \varepsilon > 0.$$

L – **індуктивність** провідника, його власна характеристика, чисельно рівна відношенню магнітного потоку провідника, який виникає довкола, до сили струму в ньому:

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta I}. \quad (10.35)$$

Індуктивність провідника чисельно рівна ЕРС самоіндукції в провіднику при зміні сили струму в ньому на одиницю за одиницю часу:

$$L = \varepsilon_{\text{с.і.}} \cdot \frac{\Delta t}{|\Delta I|}. \quad (10.36)$$

Одиниця виміру індуктивності в СІ – 1 Гн (1 генрі).

Генрі – це індуктивність провідника, довкола якого магнітний потік змінюється на 1 Вб при зміні в ньому сили струму на 1 А:

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

Або:

Генрі – це індуктивність провідника, в якому виникає ЕРС самоіндукції 1 В при зміні сили струму в ньому на 1 А за 1 с.

Індуктивність провідника залежить від його розмірів і форми, наявності феромагнітного сердечника. Індуктивність струму (замкнутого у вигляді кільця соленоїда) максимально залежить від числа витків (N) і магнітних властивостей сердечника (μ):

$$L = \mu \mu_0 \cdot \frac{N^2 S}{l}. \quad (10.37)$$

Генрі – це величезна індуктивність. Індуктивність звичайних обмоток з сердечниками становить декілька мГн.

Індуктивність контура є мірою його «інертності» по відношенню до зміни струму в контурі. У цьому сенсі індуктивність L контура в електродинаміці відіграє таку ж роль, як маса m тіла в механіці.

Взаємна індукція.

Явище взаємної індукції полягає у виникненні індукційного поля в провідниках, які знаходяться поблизу від інших провідників із струмами, що змінюються з часом. Так, якщо сила струму I_1 в контурі 1 змінюється, то в контурі 2, який не містить джерела струму, виникає індуковане поле,

що характеризується ЕРС взаємної індукції $\varepsilon_{в.і.21}$. Створюється індукційний струм, який виявляється гальванометром (рис. 10.20).

За законом електромагнітної індукції Фарадея

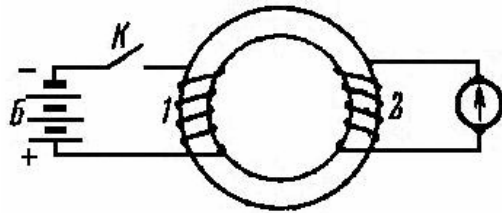


Рис. 10.20

$$\varepsilon_{в.і.21} = -\frac{\Delta\Phi_{21}}{\Delta t}, \quad (10.38)$$

де Φ_{21} – потік магнітної індукції, який створюється магнітним полем струму I_1 і пронизує площу поверхні, обмежену контуром 2.

Магнітний потік Φ_{21} пропорційний силі струму I_1 в контурі 1:

$$\Phi_{21} = M_{21}I_1, \quad (10.39)$$

де M_{21} – коефіцієнт, який називається взаємною індуктивністю другого і першого контурів. M_{21} залежить від розмірів, геометричної форми і взаємного розташування контурів 1 і 2 і, крім того, від відносної магнітної проникності середовища, в якому знаходяться контури.

Енергія магнітного поля контура. Енергетичною характеристикою магнітного поля служить потік магнітної індукції (магнітний потік) Φ . Енергію магнітного поля контура (або котушки) індуктивністю L при протіканні по ньому струму силоміць від 0 до I визначають рівнянням:

$$W = I\Phi, \quad (10.40)$$

де $\Phi = LI/2$.

Отже, енергія магнітного поля котушки із струмом

$$W = \frac{LI^2}{2}. \quad (10.41)$$

Цю енергію котушка отримує від зовнішнього джерела, оскільки в котушці не відбувається змін, які могли б служити джерелом енергії.

Густина енергії магнітного поля:

$$\omega_{\text{магн}} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}, \quad [\omega] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \quad (10.42)$$

Контрольні запитання

1. Що називається магнітним полем? Як можна його виявити?
2. Яке поле існує в просторі, який оточує провідники із струмом і постійні магніти?
3. Як називається основна характеристика магнітного поля?
У яких одиницях вона виражається?
4. Як визначається напрям вектора магнітної індукції?
5. Як графічно зображається магнітне поле?
6. Як визначається напрям лінії магнітної індукції?
7. Нарисуйте картину магнітного поля прямолінійного провідника із струмом.
8. Нарисуйте картину однорідного магнітного поля.
9. Нарисуйте картину магнітного поля соленоїда.
10. Нарисуйте два провідники з однаковими паралельними струмами.
Де індукція магнітного поля дорівнюватиме нулю?
11. Яке магнітне поле однорідне, а яке – неоднорідне?
12. Яка дія на провідник із струмом надає магнітне поле?
13. Сформулюйте закон Ампера.
14. Як визначити напрям сили за законом Ампера?
15. Запишіть формулу для модуля вектора індукції магнітного поля прямолінійного струму.
16. У чому виявляється принцип суперпозиції при накладенні магнітних полів?
17. Антипаралельні струми відштовхуються.
Як взаємодіють паралельні струми?
18. Дайте визначення одиниці сили струму в системі СІ.
19. Яка сила діє на рухомий електричний заряд в магнітному полі? Як вона напрямлена?
20. Напишіть формулу для сили Лоренца.
21. Що називається магнітним потоком? (Напишіть формулу і дайте визначення).
22. Що є одиницею виміру магнітного потоку в системі СІ?
23. Як можна змінити магнітний потік через контур?
24. Як потрібно розташувати контур в однорідному магнітному полі, аби магнітний потік крізь нього дорівнював нулю?
25. Що таке: магнетики, діамагнетики, парамагнетики, феромагнетики?
26. Що таке магнітна проникність середовища?
27. Яке явище називається електромагнітною індукцією?
28. За яких умов виникає індукційний електричний струм?
29. Сформулюйте закон Ленца.
30. Як напрям індукційного струму визначити за правилом правої руки?

31. Сформулюйте основний закон електромагнітної індукції (закон Фарадея).
32. Яке явище називається самоіндукцією?
33. Запишіть формулу ЕРС самоіндукції.
34. Якою одиницею виражають індуктивність?
35. Дайте визначення одиниці індуктивності.
36. Напишіть формулу для енергії магнітного поля котушки із струмом.
37. Чому дорівнює щільність енергії магнітного потоку?
У яких одиницях вона вимірюється?