

**Міністерство аграрної політики та продовольства України
Харківський національний аграрний університет імені В.В. Докучаєва**

М.Я. Рохманов, С.С. Авотін

ФІЗИКА

**Навчальний посібник
для самостійної підготовки студентів**

За загальною редакцією
С.С. Авотіна

Харків – 2015

УДК 53(075.8)
ББК ВЗЯ 7
Р 11

*Рекомендовано до друку Міністерством аграрної політики та продовольства України як навчальний посібник для підготовки фахівців ОКР «бакалавр» напряму 6.080101 «Геодезія, картографія та землеустрій» у вищих навчальних закладах III–IV рівнів акредитації Міністерства аграрної політики та продовольства України
(лист № 37-128-13/15135 від 03.10.2014 р.)*

Рецензенти:

О.Г. Андерс, д-р фіз.-мат. наук, професор, завідувач кафедри загальної фізики Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна;
А.А. Мамалуй, д-р фіз.-мат. наук, професор, завідувач кафедри загальної і експериментальної фізики Національного технічного університету «ХПІ»;
А.І. Козарь, д-р фіз.-мат. наук, професор Харківського національного університету радіоелектроніки

Рохманов М.Я.

Р 11 Фізика: навч. посіб. для самост. підготовки студ. / М.Я. Рохманов, С.С. Авотін; за заг. ред. С.С. Авотіна; Харк. нац. аграр. ун-т. – Х.: ХНАУ, 2015. – 283 с.

Подано основні відомості з кількох розділів фізики: механіки, молекулярної фізики і термодинаміки, електрики та магнетизму, оптики, атомної та ядерної фізики. Наведено приклади розв'язання задач, задачі для розв'язання. Посібник складено згідно з навчальною програмою.

Призначено для студентів інженерних спеціальностей вищих аграрних навчальних закладів III і IV рівнів акредитації.

**УДК 53(075.8)
ББК ВЗЯ 7**

© Рохманов М.Я.,
Авотін С.С., 2015
© ХНАУ, 2015
© Обкладинка
Авотіна С.С., 2015

Навчальне видання

Рохманов Микола Якович
Авотін Станіслав Сергійович

ФІЗИКА

Навчальний посібник
для самостійної підготовки студентів

За загальною редакцією
С.С. Авотіна

Відповідальний за випуск канд. фіз.-мат. наук С.С. Авотін
Редактори А.М. Чорна, О.В. Васільєва
Коректор М.А. Захарченко
Комп'ютерний набір і верстка – С.С. Авотін

Підп. до друку 03.06.2014. Формат 60x84/16. Обсяг 16,4 ум.-друк. арк.
18,0 обл.-вид арк. Тираж 300. Зам. №

Виробник – редакційно-видавничий відділ Харківського національного аграрного університету ім. В.В. Докучаєва, 62483, Харківська обл., Харківський р-н, п/в «Комуніст-1», навчальне містечко ХНАУ, тел. 99-72-70.
E-mail: office@knau.kharkov.ua

Виготовлювач – дільниця оперативного друку ХНАУ, тел 99-77-80

Зміст

| | |
|--|----|
| <i>Вступ</i> | 7 |
| 1. Кінематика матеріальної точки | 10 |
| 1.1. Кінематика поступального руху | 10 |
| 1.2. Кінематика обертального руху | 13 |
| 1.3. Повне прискорення при криволінійному русі | 15 |
| 2. Динаміка поступального руху | 16 |
| 2.1. Закони динаміки матеріальної точки | 16 |
| 2.2. Імпульс. Закон збереження імпульсу | 17 |
| 2.3. Центр мас (центр інерції) механічної системи | 19 |
| 2.4. Робота змінної сили. Потужність | 20 |
| 2.5. Механічний принцип відносності | 21 |
| 3. Енергія. Силове потенціальне поле. Сили в механіці | 22 |
| 3.1. Енергія. Кінетична енергія | 22 |
| 3.2. Силове потенціальне поле. Потенціал | 23 |
| 3.3. Графічне зображення енергії | 24 |
| 3.4. Сили в механіці | 25 |
| 4. Динаміка обертального руху | 30 |
| 4.1. Момент сили | 30 |
| 4.2. Момент інерції | 30 |
| 4.3. Момент імпульсу | 32 |
| 4.4. Робота та кінетична енергія при обертальному русі | 33 |
| 4.5. Основний закон динаміки обертального руху. Закон збереження моменту імпульсу | 33 |
| 4.6. Вільні осі обертання. Гіроскопи | 34 |
| 5. Елементи механіки рідин і газів | 36 |
| 5.1. Потік рідини. Рівняння нерозривності | 36 |
| 5.2. Тиск у рідині та газі. Рівняння Бернуллі | 39 |
| 6. Основи молекулярної фізики | 41 |
| 6.1. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії речовини | 41 |
| 6.2. Ідеальний газ. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії (МКТ) ідеального газу | 43 |
| 6.3. Ізопроцеси у газах | 45 |
| 6.4. Рівняння Менделєєва-Клапейрона | 47 |
| 6.5. Закон Дальтона | 48 |
| 6.6. Вологість повітря | 48 |
| 7 Основи класичної статистики. Явища переносу | 49 |
| 7.1. Розподіл Максвелла. Швидкості молекул газу | 49 |
| 7.2. Барометрична формула. Розподіл Больцмана | 51 |

| | |
|--|-----|
| 7.3. Середня довжина вільного пробігу молекул газу | 53 |
| 7.4. Явища переносу | 54 |
| 7.4.1. Теплопровідність. Закон Фур'є | 54 |
| 7.4.2. В'язке тертя. Закон Ньютона | 54 |
| 7.4.3. Дифузія. Закон Фіка. Осмос | 55 |
| 8. Реальні гази. Властивості рідини | 58 |
| 8.1. Реальні гази. Рівняння Ван-дер-Ваальса | 58 |
| 8.2. Властивості рідини | 60 |
| 8.2.1. Структура і властивості води | 60 |
| 8.2.2. Поверхневий натяг. Капілярні явища | 61 |
| 8.2.3. Рідкі кристали | 65 |
| 9. Основи термодинаміки | 67 |
| 9.1. Внутрішня енергія | 67 |
| 9.2. Робота ідеального газу | 68 |
| 9.3. Перший закон термодинаміки | 72 |
| 9.4. Фазові перетворення. Діаграма стану системи | 72 |
| 9.5. Адіабатичний процес. Рівняння Пуассона | 75 |
| 9.6. Ефект Джоуля-Томсона. Зрідження газів | 77 |
| 9.7. Теплова машина. Другий закон термодинаміки | 78 |
| 9.8. Ентропія. Статистична інтерпретація ентропії | 81 |
| 10. Твердий стан речовини | 84 |
| 11. Електростатика | 90 |
| 11.1. Електричний заряд. Закон Кулона | 90 |
| 11.2. Електричне поле. Напруженість. Принцип суперпозиції полів | 93 |
| 11.3. Провідники і діелектрики в електричному полі | 96 |
| 11.4. Робота сил електричного поля. Потенціал. Різниця потенціалів | 99 |
| 11.5. Електроємність. Конденсатори | 103 |
| 12. Електродинаміка | 106 |
| 12.1. Постійний електричний струм. Джерела струму | 106 |
| 12.2. Сила струму. Закон Ома для ділянки кола. | 108 |
| 12.3. Сполука провідників і джерел струму | 113 |
| 12.4. Розгалужені кола. Правила Кірхгофа | 116 |
| 12.5. Робота і потужність постійного струму | 117 |
| 12.6. Електронна теорія провідності металів | 119 |
| 12.7. Робота виходу електронів з металу | 120 |
| 12.8. Явище термоелектронної емісії | 121 |
| 12.9. Електричний струм в електролітах і газах | 123 |

| | |
|---|-----|
| 13. Магнітне поле | 126 |
| 13.1. Взаємодія провідників зі струмом | 126 |
| 13.2. Магнітне поле струму | 127 |
| 13.3. Сила Ампера. Вектор магнітної індукції | 129 |
| 13.4. Рамка зі струмом у магнітному полі | 130 |
| 13.5. Закон Біо-Савара-Лапласа | 132 |
| 13.6. Магнітний потік. Поле у речовині. Сила Лоренца | 135 |
| 13.7. Магнітне поле біологічних об'єктів | 141 |
| 14. Електромагнітна індукція | 143 |
| 14.1. Явище електромагнітної індукції | 143 |
| 14.2. Явище самоіндукції. Індуктивність | 145 |
| 14.3. Енергія магнітного поля | 146 |
| 15. Коливання і хвилі | 147 |
| 15.1. Коливальний рух. Гармонійні коливання | 147 |
| 15.2. Пружний, математичний і фізичний маятники | 149 |
| 15.3. Додавання гармонійних коливань | 152 |
| 15.4. Загасаючі і вимушені коливання. Резонанс | 153 |
| 15.5. Механічні хвилі в пружному середовищі | 156 |
| 16. Змінний електричний струм | 160 |
| 16.1. Одержання змінного електричного струму | 160 |
| 16.2. Опір в електричному колі змінного струму | 162 |
| 16.3. Передача і використання електроенергії | 164 |
| 17. Електромагнітні коливання і хвилі | 166 |
| 17.1. Вільні коливання в коливальному контурі | 166 |
| 17.2. Одержання незгасаючих електромагнітних коливань | 169 |
| 17.3. Електромагнітні хвилі | 170 |
| 17.4. Випромінювання і прийом електромагнітних хвиль | 172 |
| 18. Геометрична оптика | 174 |
| 18.1. Розвиток поглядів на природу світла | 174 |
| 18.2. Закони відбиття світла | 176 |
| 18.3. Побудова зображення у сферичному дзеркалі | 177 |
| 18.4. Закони заломлення світла | 179 |
| 18.5. Оптичні прилади | 181 |
| 19. Хвильова оптика | 185 |
| 19.1. Інтерференція світла | 185 |
| 19.2. Дифракція світла | 186 |
| 19.3. Дифракція рентгенівських променів | 191 |
| 19.4. Поняття про голографію | 192 |

| | |
|--|-----|
| 19.5. Дисперсія світла | 193 |
| 19.6. Поглинання світла. Закон Бугера-Ламберта | 197 |
| 19.7. Поляризація світла | 198 |
| 20. Квантова природа електромагнітного випромінювання | 202 |
| 20.1. Теплове випромінювання та його характеристики | 202 |
| 20.2. Закони теплового випромінювання | 204 |
| 20.3. Квантова гіпотеза і формула Планка | 207 |
| 20.4. Джерела світла. Оптична пірометрія | 208 |
| 20.5. Квантова теорія випромінювання Ейнштейна. Фотоелектричний ефект | 209 |
| 20.6. Короткохвильова границя гальмового рентгенівського випромінювання | 211 |
| 20.7. Ефект Комптона | 211 |
| 20.8. Квантове та хвильове пояснення тиску світла. Дуалізм електромагнітного випромінювання | 213 |
| 21. Атомна фізика | 215 |
| 21.1. Складна будова атома | 215 |
| 21.2. Досліди Резерфорда з розсіювання α -частинок | 215 |
| 21.3. Теорія воднеподібного атома за Бором | 216 |
| 21.4. Гіпотеза де Бройля. Атом у квантовій механіці | 218 |
| 21.5. Періодична система елементів | 222 |
| 21.6. Рентгенівські і молекулярні спектри | 224 |
| 21.7. Спонтанне та вимушене випромінювання. Лазери | 228 |
| 21.8. Біологічна дія електромагнітного випромінювання | 232 |
| 22. Ядерна фізика | 233 |
| 22.1. Явище радіоактивності | 233 |
| 22.2. Активність ізотопу | 235 |
| 22.3. Реєстрація радіоактивних випромінювань | 236 |
| 22.4. Склад і будова атомного ядра | 237 |
| 22.5. Ядерні сили. Дефект маси | 239 |
| 22.6. Ядерні реакції | 241 |
| 22.7. Біологічна дія і захист від випромінювання | 243 |
| 23. Приклади розв'язання задач | 246 |
| 24. Задачі для розв'язання | 253 |
| Список рекомендованої літератури | 276 |
| Додаток | 277 |

ВСТУП

Фізика є фундаментальною наукою про природу, про найбільш загальні властивості і будову матерії, закони її руху. Сучасна фізика внесла найбільш радикальні зміни у пізнання природи і розвиток основних науково-технічних винаходів людства. Поняття, закони і методи фізики покладені в основу всіх природничих наук (хімії, біології, біофізики, астрономії) і техніки. Фізика та біофізика (біофізика розглядає фізичні та фізико-хімічні процеси в біологічних об'єктах) посідають чільне місце у сільськогосподарській освіті. Це пов'язано з тим, що у сільському господарстві є багато питань, які не можна розв'язати, якщо не зважати на закони фізики. Наприклад:

1. Вивчення фізикою властивостей рідини і газів дали змогу з'ясувати рух рідин і газів у ґрунті, рослинах, у природі взагалі. Це дозволяє прогнозувати ситуацію, що суттєво впливає на врожай.

2. Вивчення законів термодинаміки дуже важливе, оскільки температура відіграє величезну роль у розвитку рослин. Від температури повітря, ґрунту, від змін цієї температури протягом вегетативного періоду залежить урожай.

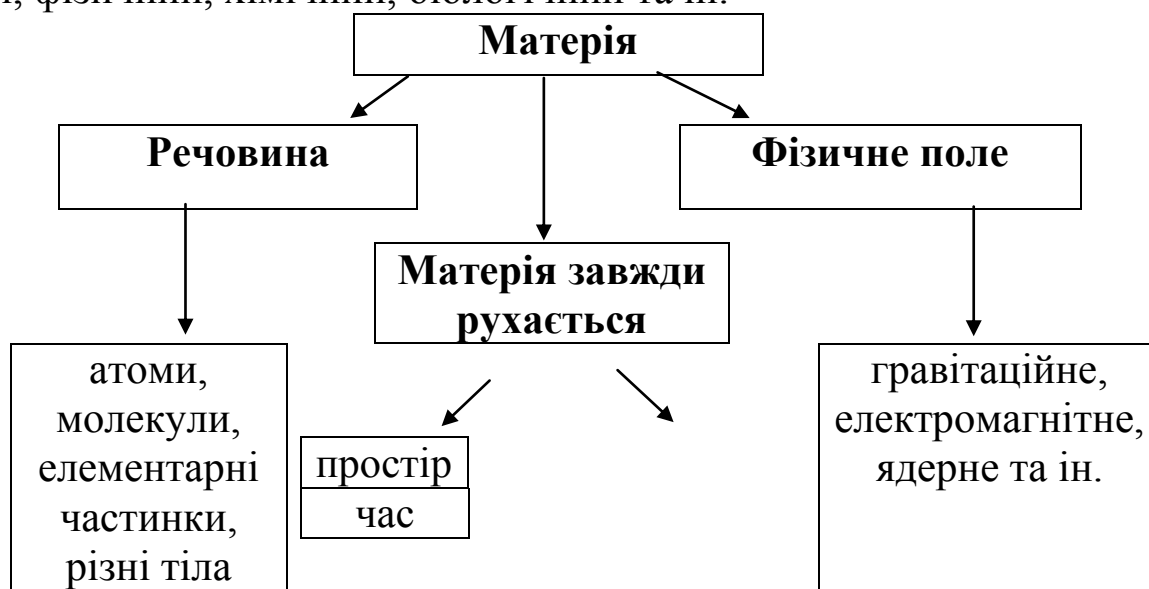
3. Такі фізичні фактори, як вологість ґрунту і повітря, обмін ґрунтового повітря з атмосферним, освітленість (згадайте фотосинтез), також у значній мірі впливають на нормальний ріст та розвиток рослин.

4. Працівників лісового господарства, спеціалістів із захисту рослин завжди цікавлять такі фізичні питання, як поглинання сонячної енергії землею, випромінювання поверхнею землі теплоти, перетворення води в пару і конденсація, електричні і електромагнітні явища в атмосфері, ґрунті, екологічні проблеми радіаційного забруднення території.

Термін “фізика” походить від грецького слова “physis” – природа. В епоху античної культури наука охоплювала всю сукупність знань про природу. З часом виділились окремі науки, в тому числі і фізика. Фізика – наука експериментальна. Основні етапи фізичного пізнання – спостереження, експеримент, гіпотеза, фізична теорія. На основі спостережень і дослідів людина послідовно пізнає різні види і форми матерії, вивчає характер їх руху і, таким чином, відкриває таємниці природних явищ та узагальнює одержані відомості у вигляді законів. Фізика вивчає властивості матерії. Що таке матерія?

Матерія – філософське поняття (категорія) – це все, що реально існує навколо нас. Ми знаємо дві форми матерії: речовина і фізичне поле. **Речовина** – це все, що складається з атомів і молекул (різні предмети, планети, зірки і т.д.). **Фізичне поле** передає взаємодію між атомами речовини (гравітаційне поле, електромагнітне поле та ін).

Матерія завжди рухається, рух сам по собі притаманний матерії. **Рух** – будь-які зміни в природі. Існують такі види руху: механічний, фізичний, хімічний, біологічний та ін.



При певних умовах матерія переходить з однієї форми в іншу. Спостерігається народження і анігіляція частинок. Під час ядерних перетворень частина маси елементарних частинок перетворюється в енергію.

У свій час (більше ста років тому) у фізиці були зроблені такі великі відкриття, як закон збереження імпульсу, закон збереження моменту імпульсу, закон збереження і перетворення енергії, закони термодинаміки. Коли почала розвиватися наука про атоми і ядро, про елементарні частинки, з'явилися дані про зникнення і народження частинок, про наявність "темної маси" і "темної енергії" Всесвіту.

Якщо ми розглянемо будь-яку речовину, то її зовні нерухомий стан на мікрорівні пов'язаний з рухом якихось елементарних об'єктів – атомів у кристалах, елементарних частинок в атомах та ін.

Світ наповнений також рухами, пов'язаними з біологічними, хімічними процесами, діяльністю людини тощо. Зокрема, рослинам притаманні як мікро – так і макрорухи: внутрішньоклітинні рухи, ростові рухи, рухи внаслідок тропізмів (гравітропізм, фототропізм), настичні рухи (мухоловка). Найпростіші – джгутикові, що живуть на

Землі вже 1,5 млрд років, рухаються за допомогою локомоторного руху, війчасті (інфузорія) – за допомогою війок.

Фізика в останнє століття розвивалася значними темпами. Створена теорія електромагнітного поля, вивчені електромагнітні хвилі, сформульовані основні положення загальної теорії відносності, квантової механіки, фізики напівпровідників, надпровідності, фізики низьких температур. Вони широко застовуються в нашому повсякденному житті.

У 1933 р. у Кембриджі і Харкові було розщеплено атомне ядро. Перші напівпровідникові прилади з'явилися у 1924 р., у 1951 р. – перший транзистор, у 1965 р. – мікроелектронні пристрої замінили величезні пристрої РЕА на електронних лампах, у 1967 р. – з'явилась ЕОМ.

Космічна техніка не змогла б мати таких досягнень, які вона має, без досягнень фізики. Автоматичні системи життєзабезпечення дозволяють космічним станціям функціонувати на орбіті роками. Без досягнень фізики це було б зовсім неможливо. Фізика має спільні об'єкти і методи дослідження з іншими природничими науками, внаслідок чого виникли цілі галузі знань: фізична хімія, хімічна фізика, хімічна термодинаміка, астрофізика, геофізика, біофізика та ін. Основою сучасної фізики є математика.

Математика – це мова фізики. Без математики не можна було створити теорію електромагнітного поля, статистичну теорію, термодинаміку, теорію відносності, квантову механіку тощо.

Фізика має надзвичайно велике загальнонаукове значення як одна із галузей інтелектуальної діяльності людини, що формує сучасне світосприйняття і світорозуміння.

Фізика має такі розділи: механіка, молекулярна фізика і термодинаміка, електрика і магнетизм, хвильова і квантова оптика, атомна і ядерна фізика.

Механіка – розділ фізики, в якому вивчають найпростішу форму руху матерії – механічний рух.

Механіку поділяють на класичну і сучасну. У класичній механіці вважається, що простір абсолютний, однорідний, неперервний та ізотропний, має три вимірювання. Час – абсолютний, однорідний, неперервний. Простір і час не залежать від наявності тіл.

Класична механіка вивчає різні види механічного руху (кінематика), причини руху (динаміка) і умови рівноваги (статика).

1. КІНЕМАТИКА МАТЕРІАЛЬНОЇ ТОЧКИ

1.1. Кінематика поступального руху

Механічний рух – це процес зміни з часом взаємного розташування тіл або їх частин у просторі. Основна задача механіки – визначити розташування тіла та його швидкість у будь-який момент часу.

Усі тіла і частинки в природі перебувають у неперервному русі. Для опису механічного руху будь-якого тіла потрібно вказати на інше тіло, яке умовно вважатиметься нерухомим. Таке тіло називається тілом відліку.

Для опису механічного руху у фізиці приймають спрощені моделі реальної дійсності: матеріальна точка, ідеальний газ та ін.

Матеріальна точка – макроскопічне тіло, розмірами і формою якого можна знехтувати в умовах задачі.

Абсолютно тверде тіло – фізичне тіло, яке не зазнає деформацій у процесі руху за будь-яких умов.

Система відліку – сукупність тіла відліку, зв'язаної з ним системи координат, вибраного засобу вимірювання часу.

Траєкторія – сукупність точок простору, які послідовно проходить матеріальна точка, що рухається. Форма траєкторії залежить від вибору системи відліку.

Існують три способи опису механічного руху:

1. Функціональний (основне рівняння руху – залежність шляху від часу): $S = S(t)$.

2. Векторний (основне рівняння руху – залежність радіуса-вектора від часу): $\vec{r} = \vec{r}(t)$, де $\vec{r} = \vec{r}_x + \vec{r}_y + \vec{r}_z$; де $\vec{r} = \vec{r}_x + \vec{r}_y + \vec{r}_z$;

за модулем $r = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2}$;

$$\cos \alpha = \frac{r_x}{r}; \quad \cos \beta = \frac{r_y}{r};$$

$$\cos \gamma = \frac{r_z}{r};$$

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1.$$

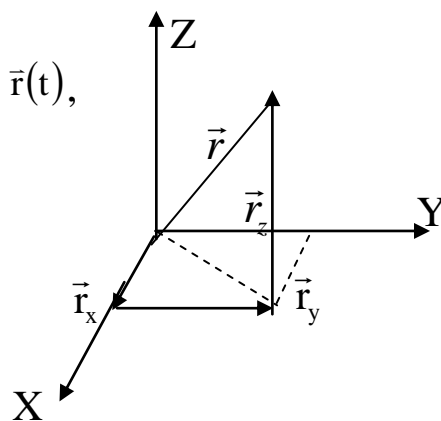


Рис.1.1

3. Координатний (основне рівняння руху – залежності координат від часу):

$$\begin{cases} r_x = x(t); \\ r_y = y(t); \\ r_z = z(t). \end{cases}$$

Оскільки декартові координати точки чисельно збігаються з проєкціями вектора на осі координат, то має місце розкладання:

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

де $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – одиничні вектори (орти) уздовж додатних напрямків осей ОХ, ОУ, ОZ (рис.1.3) відповідно. Довжина кожного з ортів дорівнює $|\vec{i}| = |\vec{j}| = |\vec{k}| = 1$

Основні характеристики механічного руху

Шлях – довжина ділянки траєкторії. Шлях S , що пройдений точкою з її початкового положення, є скалярною функцією часу: $S = S(t)$. Шлях є сумою довжин усіх ділянок траєкторії, тому вона не може бути негативною величиною.

Переміщення – це спрямований відрізок прямої, що з'єднує початкове і кінцеве положення тіла $\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$. Очевидно (рис. 1.2, 1.3), що за модулем переміщення менше або дорівнює довжині шляху $\Delta r \leq \Delta S$.

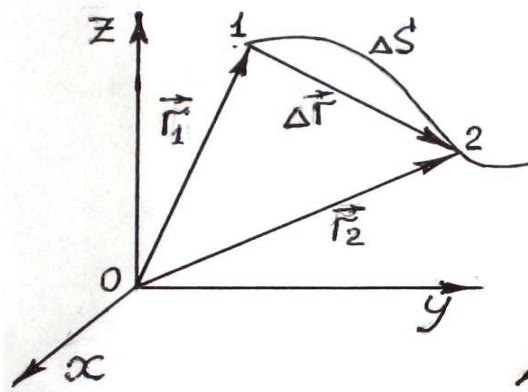


Рис.1.2

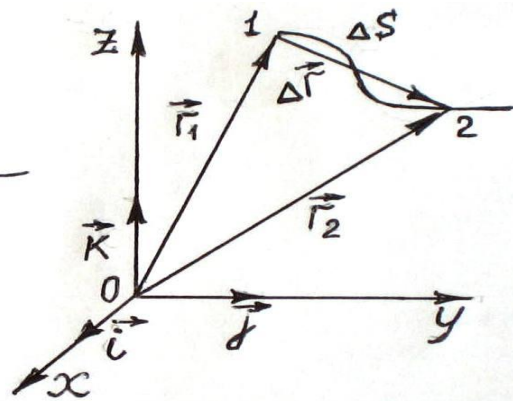


Рис.1.3

Рух матеріальних об'єктів характеризується швидкістю.

Середньою шляховою швидкістю нерівномірного руху точки на шляху S називається фізична величина, що дорівнює відношенню загального шляху до часу руху:

$$\langle v \rangle = \frac{S}{t}. \quad (1.1)$$

Миттєва швидкість (за модулем) дорівнює границі, до якої прямує відношення шляху ΔS до часу, якщо час прямує до нуля:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{dS}{dt} \quad (1.2)$$

Тобто миттєва швидкість точки дорівнює першій похідній від шляху за часом. При такому визначенні ми матимемо лише абсолютну величину швидкості, в той час як швидкість – це величина, що характеризується ще й напрямком.

Миттєва швидкість матеріальної точки (як векторна величина) дорівнює першій похідній за часом від радіуса-вектора цієї точки \vec{r} :

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (1.3)$$

Вектор швидкості \vec{v} завжди спрямований за дотичною до траєкторії і може бути представлений у вигляді:

$$\vec{v} = \vec{v}_x + \vec{v}_y + \vec{v}_z \quad (1.4)$$

де $\vec{v}_x, \vec{v}_y, \vec{v}_z$ – проекції швидкості на осі координат. Вони дорівнюють:

$$v_x = \frac{dx}{dt}, \quad v_y = \frac{dy}{dt}, \quad v_z = \frac{dz}{dt} \quad (1.5)$$

Модуль вектора швидкості:

$$v = |\vec{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1.6)$$

При нерівномірному русі швидкість може змінюватись і за величиною, і за напрямком. Для характеристики зміни швидкості введемо поняття прискорення.

Прискорення – це векторна фізична величина, що дорівнює зміні швидкості за одиницю часу:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (1.7)$$

тобто прискорення – це перша похідна від швидкості за часом.

Будь-який складний рух поділяється на найпростіші. Розрізняють два простих типи рухів – *поступальний і обертальний*. При поступальному русі траєкторії усіх точок твердого тіла ідентичні в будь-який момент часу, тобто швидкості і прискорення однакові для всіх точок твердого тіла.

1.2. Кінематика обертального руху

За формою траєкторії розрізняють прямолінійний та криволінійний рухи. Найбільш простим криволінійним рухом є обертальний. **Обертальним** називають такий рух, при якому всі точки тіла описують кола з центрами, що розміщені на одній прямій, яка називається віссю обертання.

Шлях і лінійна швидкість не можуть бути основними кінематичними характеристиками, тому що вони залежать від відстані до осі обертання (рис.1.4). Положення точки можна визначити завдяки відліку кута φ , який утворюють радіус точки і початковий радіус. Таким чином, **кінематичне рівняння обертального руху – це залежність кута обертання від часу: $\varphi = \varphi(t)$** . Кутове переміщення $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$. Кутове переміщення за дуже малий час $dt \rightarrow d\varphi$.

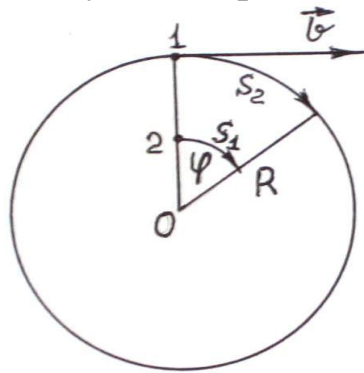


Рис.1.4

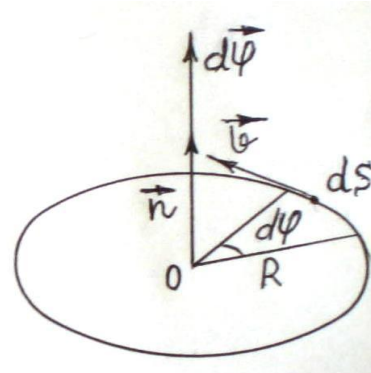


Рис.1.5

Вектор кутового переміщення $d\vec{\varphi} = d\varphi \vec{n}$ – вектор, що за модулем дорівнює куту елементарного оберту $d\varphi$ і спрямований по осі обертання (рис.1.5). Напрямок вектора кутового переміщення визначається за правилом буравчика (правого гвинта).

Середня кутова швидкість $\langle \vec{\omega} \rangle$ – фізична величина, що дорівнює кутовому переміщенню $\Delta\varphi$ за одиницю часу (вимірюється в рад/с):

$$\langle \vec{\omega} \rangle = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}. \quad (1.8)$$

Миттєва кутова швидкість $\vec{\omega}$ – це похідна від переміщення за часом:

$$\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}. \quad (1.9)$$

Миттєва кутова швидкість ($\vec{\omega}$) – вектор, що спрямований по осі обертання. Напрямок кутової швидкості визначається за правилом свердлика.

Кутове прискорення ($\vec{\varepsilon}$) – зміна вектора кутової швидкості за одиницю часу.

Середнє кутове прискорення $\langle \vec{\varepsilon} \rangle$ дорівнює зміні швидкості за одиницю часу (вимірюється в рад/с²):

$$\langle \vec{\varepsilon} \rangle = \frac{\Delta \vec{\omega}}{\Delta t}. \quad (1.10)$$

Миттєве кутове прискорення $\vec{\varepsilon}$ – це похідна від кутової швидкості за часом:

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}. \quad (1.11)$$

Напрямок векторів $\vec{\omega}$ та $\vec{\varepsilon}$ при прискореному (рис.1.6) та сповільненому русі зображено на рис. 1.6; 1.7.

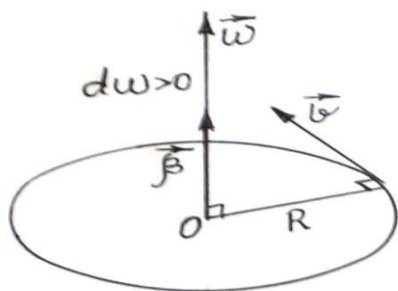


Рис.1.6

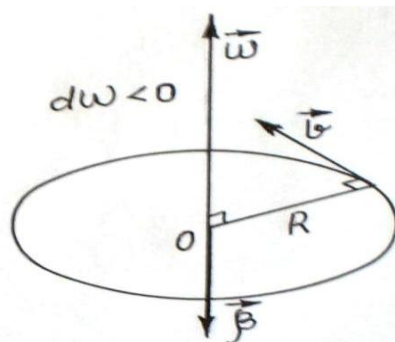


Рис.1.7

Період обертання T – час одного повного оберту на кут 2π рад.
Частота обертання ν – число обертів за одиницю часу [1/с]:

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

Зв'язок між лінійними і кутовими параметрами

Шлях точки по дузі кола $\Delta S = \Delta \varphi R$, де $\Delta \varphi$ кут в радіанах, тоді

$$\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{R} \quad (1.12)$$

З формули (1.12) виходить, що лінійна швидкість зростає із збільшенням радіуса. Ураховуючи, що $\omega \perp R$ і $\sin(\omega R) = 1$, то для обертального руху:

$$\vec{v} = [\vec{\omega} \times \vec{R}] \quad (1.13)$$

Лінійна швидкість дорівнює векторному добутку кутової швидкості на радіус-вектор точки.

1.3. Повне прискорення при криволінійному русі

При нерівномірному русі швидкість може змінюватись як за модулем, так і за напрямком. Зміна швидкості за напрямком характеризується нормальним (доцентровим) прискоренням $a_n = v^2/R$. Зміна швидкості за модулем характеризується тангенціальним (дотичним) прискоренням $a_t = dv/dt$.

Вектор повного прискорення дорівнює сумі нормального і тангенціального прискорення:

$$\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_t. \quad (1.14)$$

Модуль повного прискорення дорівнює кореню квадратному із суми квадратів нормального і тангенціального прискорення:

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_t^2} = \sqrt{\frac{v^2}{R^2} + \left(\frac{dv}{dt}\right)^2} \quad (1.15)$$

Напрямок векторів швидкості і зміни швидкості показано на рис 1.8.

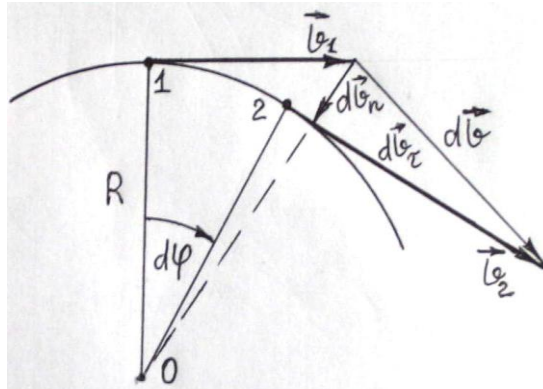


Рис.1.8

Контрольні запитання

1. Що таке матеріальна точка, абсолютно тверде тіло?
2. Які засоби опису руху ви знаєте?
3. Що таке шлях, переміщення? Яка різниця між ними?
4. Що таке середня шляхова швидкість?
5. Що таке миттєва швидкість? Запишіть формулу.
6. Що таке прискорення? Запишіть формули середнього, миттєвого прискорення.
7. Що таке кутове переміщення, кутова швидкість? Як напрямлений вектор кутової швидкості?
8. Що таке кутове прискорення? Як напрямлено кутове прискорення?

9. Які існують зв'язки між поступальними і обертальними характеристиками руху?
10. Що таке нормальне, тангенціальне та повне прискорення? Як вони напрямлені? Запишіть формули.

2. ДИНАМІКА ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ

2.1. Закони динаміки матеріальної точки

Динаміка вивчає причини зміни характеру руху тіл. В основі динаміки – закони Ньютона.

• *Перший закон Ньютона (закон інерції): існують такі системи відліку, відносно яких будь-яке тіло зберігає стан руху доки, доки інші тіла не змусять його змінити цей стан ($v = \text{const}$).* Властивість тіл зберігати стан руху називають *інертністю*. Системи відліку, в яких виконуються закони механіки, називаються інерціальними.

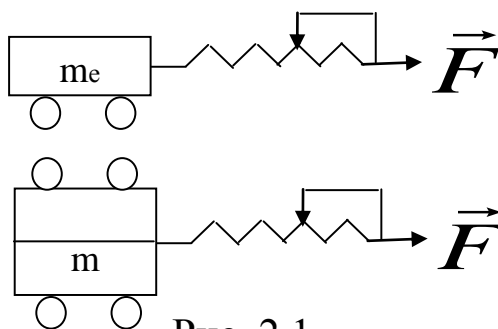
Другий закон Ньютона встановлює зв'язок між зміною стану руху і дією інших тіл. Експерименти свідчать, що причина зміни стану руху – сила. **Сила** – векторна фізична величина, що є мірою зміни швидкості або деформації тіл. Сила характеризується модулем, напрямком і точкою прикладання.

• *Другий закон Ньютона: зміна стану руху (\vec{a}) матеріального об'єкта пропорційна силі, яка її викликає, і збігається з нею за напрямком:*

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{1}{m} \cdot \vec{F}, \quad (2.1)$$

де m – маса. Що таке маса? Розглянемо такий експеримент.

Припустимо, що на два тіла m та m_e діють однакові сили (рис. 2.1).



$$F = m_e a_e;$$

$$F = m a,$$

Рис. 2.1

З рис 2.1. видно, що зміна стану руху тіл (прискорення) зворотно пропорційна масам тіл, тобто чим більша маса, тим менше прискорення тіл:

$$\frac{a}{a_e} = \frac{m_e}{m}. \quad (2.2)$$

З формули (2.2) випливає, що чим більше маса тіла, тим повільніше воно змінює свою швидкість. Фізична величина, що характеризує інертність тіла, називається масою цього тіла.

Маса – скалярна фізична величина, яка є мірою інертності та гравітації. Маса – адитивна величина, тобто маса тіла дорівнює масі усіх її частинок. В міжнародній системі одиниць СІ одиниця маси – кілограм (1кг) є основною одиницею вимірювань.

Рівняння руху будь-якого об'єкта за другим законом Ньютона:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i. \quad (2.3)$$

Експерименти свідчать, що тіла завжди взаємодіють між собою.

• **Третій закон Ньютона: матеріальні об'єкти взаємодіють з силами, рівними за модулем і протилежними за напрямком** (рис.2.2):

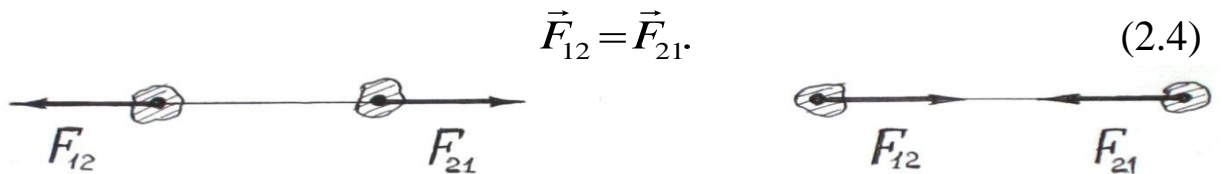


Рис.2.2

Потрібно відмітити, що ці сили завжди прикладені до різних тіл.

2.2. Імпульс. Закон збереження імпульсу

У класичній механіці, при швидкостях руху значно менших швидкості світла у вакуумі, маса є сталою величиною. Тоді

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad (2.5)$$

де векторна величина $\vec{p} = m\vec{v}$ називається імпульсом матеріальної точки.

Загальна формула другого закону динаміки (через імпульс): швидкість зміни імпульсу дорівнює силі, яка діє на матеріальну точку:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}. \quad (2.6)$$

Сукупність матеріальних точок (тіл), які розглядаються як єдине ціле, називається механічною системою. Механічна система, в якій тіла взаємодіють тільки між собою, називається *замкненою*. Розглянемо механічну систему, яка складається з n тіл (рис. 2.3).

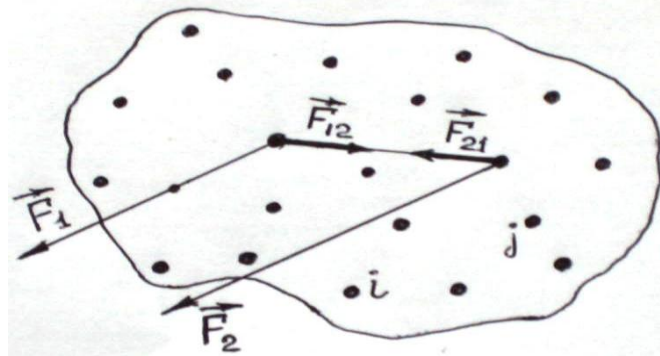


Рис.2.3

Нехай на тіла системи діють зовнішні сили $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$, а \vec{F}_{ik} – внутрішня сила, яка діє на i -те тіло з боку k -го тіла. Запишемо другий закон Ньютона для кожного з n тіл системи:

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{p}_1}{dt} &= \vec{F}_1 + \vec{F}_{21} + \vec{F}_{31} + \dots + \vec{F}_{n1} \\ \frac{d\vec{p}_2}{dt} &= \vec{F}_2 + \vec{F}_{12} + \vec{F}_{32} + \dots + \vec{F}_{n2} \\ &\dots \\ \frac{d\vec{p}_n}{dt} &= \vec{F}_n + \vec{F}_{1n} + \vec{F}_{2n} + \dots + \vec{F}_{(n-1)n} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Додаючи праві і ліві частини цих рівнянь, отримаємо:

$$\frac{d(\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n)}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n + \vec{F}_{21} + \vec{F}_{12} + \dots + \vec{F}_{n1} + \vec{F}_{1n} + \dots + \vec{F}_{(n-1)n} + \vec{F}_{n(n-1)} \quad (2.8)$$

За третім законом Ньютона сили, які діють між будь-якими тілами, рівні за модулем і протилежні за напрямком $\vec{F}_{ik} = -\vec{F}_{ki}$, тому внутрішні сили пружності та гравітації компенсуються.

Найбільш загальна форма другого закону Ньютона: **швидкість зміни імпульсу механічної системи** (похідна за часом від імпульсу системи) **дорівнює головному вектору зовнішніх сил.**

$$\sum_1^n \frac{d\vec{P}_i}{dt} = \sum_1^n \vec{F}_i \text{ або } \frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F}, \quad (2.9)$$

де \vec{F} – головний вектор зовнішніх сил; \vec{P} – імпульс системи.

Таким чином, за третім законом Ньютона від динаміки матеріальних точок ми переходимо до динаміки твердих тіл.

Якщо система замкнена $\vec{F} = 0$ і $\frac{d\vec{P}}{dt} = 0$, то імпульс системи не змінюється з часом.

Закон збереження імпульсу: величина і напрямок імпульсу замкненої механічної системи, в якій діють сили пружності і гравітації (консервативні сили), не змінюються з часом.

$$\vec{P} = \text{const} \quad (2.10)$$

2.3. Центр мас (центр інерції) механічної системи

Центром мас системи матеріальних точок називається геометрична точка С, радіус-вектор якої дорівнює:

$$\vec{r}_C = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i}{m_c}, \quad (2.11)$$

де m_c – загальна маса всієї системи.

Якщо радіуси-вектори \vec{r}_i проведені із центра мас, то $\vec{r}_C = 0$. Швидкість центру мас:

$$\vec{v} = \frac{1}{m_c} \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = \vec{v}_C \quad (2.12)$$

Диференціюючи це рівняння за часом, отримуємо:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = m_c \frac{d\vec{v}_C}{dt} = \vec{F} \quad (2.13)$$

Центр мас механічної системи рухається як матеріальна точка, в якій зосереджена вся маса системи.

2.4. Робота змінної сили. Потужність

Робота постійної сили на прямолінійному шляху S – це фізична величина, що дорівнює скалярному добутку сили на переміщення (рис. 2.4):

$$A = F \cdot \Delta r \cdot \cos \alpha \quad (2.14)$$

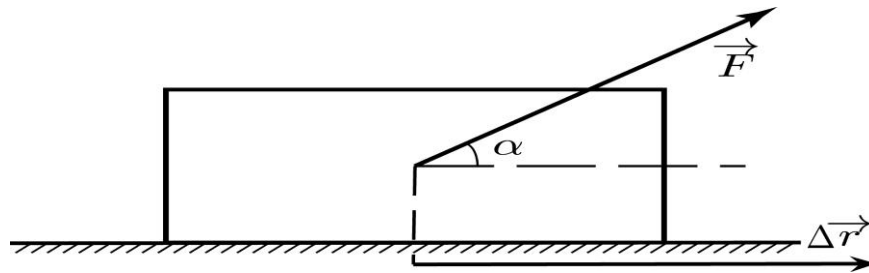


Рис.2.4

Взагалі сила може змінюватись як за модулем, так і за напрямком (рис.2.5). Елементарна робота сили \vec{f} на дуже малому (елементарному) переміщенні $d\vec{r}$ дорівнює скалярному добутку сили на переміщення:

$$dA = \vec{f} \cdot d\vec{r} \quad (2.15)$$

Загальна робота на шляху 1–2 (рис.2.5) дорівнює сумі елементарних робіт, тобто площі під кривою 1–2 на графіку рис.2.6.

$$A_{12} = \int_1^2 \vec{f} \cdot d\vec{r} \quad (2.16)$$

Одиниця вимірювання роботи – Джоуль (Дж): ~~[А·Н·м·Дж]~~

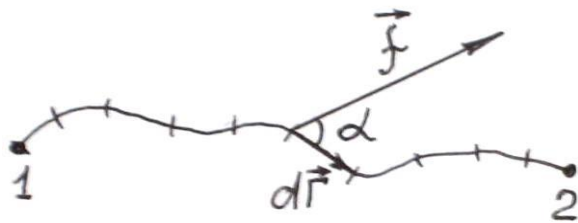


Рис.2.5

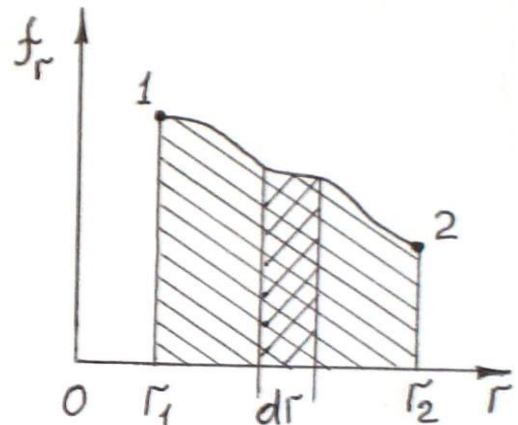


Рис.2.6

Потужність – скалярна фізична величина, що дорівнює роботі, яка виконується за одиницю часу:

~~$$P = \frac{dW}{dt} \quad (2.17)$$~~

Одиниця вимірювання потужності – Ватт (Вт):

$$[P] = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт}$$

2.5. Механічний принцип відносності

Закони динаміки виконуються тільки в інерціальних системах відліку. Розглянемо умовно нерухому інерціальну систему відліку K і систему K^1 (автомобіль). Система K^1 рухається рівномірно і прямолінійно із швидкістю v_0 відносно нерухомої системи K (рис.2.7). Відлік часу починаємо, коли початки координат збігаються.

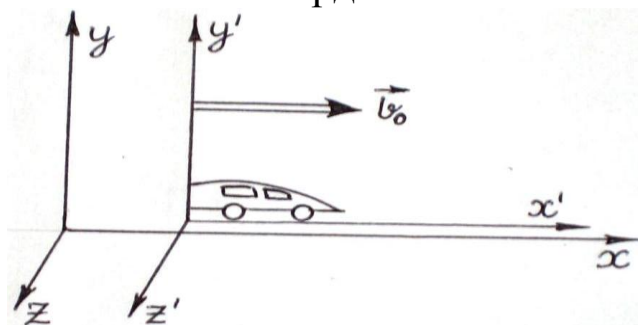


Рис.2.7

Зв'язок між координатами довільної матеріальної точки в обох системах: $x = x^1 + vt^1$, $y = y^1$, $z = z^1$. У класичній механіці передбачається, що хід часу абсолютний, тобто $t = t^1$. Сукупність цих формул називається «перетворенням координат Галілея». Отримаємо правило додавання швидкостей у класичній механіці:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dx^1}{dt^1} + v_0 \quad \text{тобто} \quad v = v^1 + v_0, \quad (2.18)$$

Отримаємо зв'язок між прискореннями в інерціальних системах відліку:

~~$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv^1}{dt^1} \quad (2.19)$$~~

Прискорення у будь-яких інерціальних системах відліку однако-ві, тому сили F і F^1 , що діють на тіло в інерціальних системах відліку K і K^1 , збігаються. **Закони динаміки однакові у будь-яких інерціаль-**

них системах відліку. Це твердження і є механічним принципом відносності.

Контрольні запитання

1. Що таке інертність? Яка фізична величина є мірою інертності тіла?
2. Що таке сила? В яких одиницях вона вимірюється?
3. Сформулюйте закони Ньютона. Запишіть формули.
4. Що таке імпульс тіла, імпульс сили?
5. Сформулюйте і запишіть формулу закону збереження імпульсу.
6. Що таке центр мас?
7. Що таке робота сили? Запишіть формулу роботи змінної сили.
8. Що таке потужність? Запишіть формулу.
9. У чому полягає механічний принцип відносності?
10. Чому закони динаміки однакові у різних інерціальних системах відліку?

3. ЕНЕРГІЯ. СИЛОВЕ ПОТЕНЦІАЛЬНЕ ПОЛЕ.

СИЛИ В МЕХАНІЦІ

3.1. Енергія. Кінетична енергія

Енергія – найбільш універсальна міра різних форм руху матерії, яка описує якісні і кількісні зміни стану руху. Запишемо рівняння руху тіла з точки 1 в точку 2 під дією постійної сили f і помножимо обидві частини рівняння на елементарне переміщення $dr = v \cdot dt$:

$$m \cdot v dt = f \cdot dr \quad (3.1)$$

У формулі $f \cdot dr$ – елементарна робота на шляху dr , а вираз зліва:

$$m \frac{dv}{dt} dt = \int_1^2 f \cdot dr \quad (3.2)$$

Вираз $\frac{mv^2}{2}$ кінетична енергія. Проінтегруємо співвідношення (3.1) з урахуванням формули (3.2):

$$\int_1^2 d\left(\frac{mv^2}{2}\right) = \int_1^2 f \cdot dr \quad (3.3)$$

$$\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = A_{12} \quad (3.4)$$

З формули (3.4) випливає, що *зміна кінетичної енергії тіла дорівнює роботі, яка виконується над тілом* (теорема про зміну кінетичної енергії), тобто робота сили – кількісна міра зміни кінетичної енергії. Таким чином, кінетична енергія характеризує здатність тіла виконати роботу.

3.2. Силове потенціальне поле. Потенціал

Силове поле – це область простору, в якому на частинку діє якась сила \vec{F} . Узагалі сила залежить від координат і часу $\vec{F}=f(x,y,z,t)$. Якщо сила не залежить від часу, то поле називається стаціонарним $\vec{F}=f(x,y,z)$. Якщо сили діють у напрямку якогось центру або в напрямку від нього поле називається центрально-симетричним. Як приклад розглянемо гравітаційне поле Землі.

Ісаак Ньютон сформулював закон всесвітнього тяжіння, згідно з яким *матеріальні точки(або сферичні тіла) притягуються одна до одної з силами, які пропорційні до їх мас m_1 і m_2 і обернено пропорційні квадрату відстані між ними:*

$$\vec{F}=\gamma\frac{m_1\cdot m_2}{r^2}, \quad (3.5)$$

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

На будь-яке тіло, що розташоване поблизу Землі, за законом всесвітнього тяжіння діє сила тяжіння F_m :

$$F_m=\gamma\frac{mM}{R^2}=mg \quad (3,6)$$

де M – маса Землі; R – радіус Землі; m – маса тіла; $g=\frac{\gamma M}{R^2}$ – прискорення вільного падіння (напруженість гравітаційного поля Землі). Сила тяжіння тіла, яке знаходиться на висоті h над поверхнею Землі:

$$F_m=\gamma\frac{mM}{(R+h)^2}. \quad (3.7)$$

Підрахуємо роботу гравітаційної сили з переміщення маси m з точки на відстані R_1 від центру Землі в точку на відстані R_2 :

$$W^g = \gamma m \Delta r \quad (3.8)$$

Відомо, що робота виконується за рахунок зменшення енергії, тобто

$$W^g = \gamma m \Delta r$$

вираз r являє собою потенціальну енергію гравітаційного поля. Вона зменшується при збільшенні відстані до центру Землі.

Таким чином (3.8), **робота гравітаційної сили дорівнює зміні потенціальної енергії, взятій з оберненим знаком.** З формули (3.8) випливає, що робота в гравітаційному полі не залежить від форми шляху, а робота по замкненому шляху дорівнює нулю. **Сили, робота яких не залежить від форми шляху, називаються консервативними.** Винесемо масу тіла за дужки:

$$W^g = \gamma m \Delta r \quad (3.9)$$

де $\varphi = \frac{\gamma M}{R}$ потенціал гравітаційного поля не залежить від маси тіла, а залежить тільки від відстані між центрами мас Землі і тіла.

У диференціальній формі елементарна робота $\delta W = F dr = dW$. Функція $W^g(r)$ повністю визначає силу F за модулем і напрямом:

$$F = -\frac{dW}{dr} \quad \text{або} \quad F_x = -\frac{\partial W}{\partial x}, \quad F_y = -\frac{\partial W}{\partial y}, \quad F_z = -\frac{\partial W}{\partial z}, \quad (3.10)$$

у векторній формі:

$$\vec{F} = -\nabla W \quad (3.11)$$

де $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – одиничні вектори (орти) координатних осей.

Конкретний вигляд W^g залежить від характеру силового поля. Так, на невеликій висоті h над поверхнею Землі ($h \ll R$) потенціальна енергія тіла дорівнює:

$$W^g = \gamma m \Delta r \quad (3.12)$$

3.3. Графічне зображення енергії

Графік залежності потенціальної енергії від зміщення (відстані) називається потенціальною кривою. Аналіз потенціальних кривих дозволяє визначити характер руху тіла. Графік потенціальної енергії ті-

ла масою m , яке підняте на висоту h над поверхнею Землі, показано на рис.3.1. Кут нахилу прямої, що проходить через початок координат, тим більший, чим більша маса тіла, оскільки $\operatorname{tg}\alpha = mg$. Якщо повна енергія тіла дорівнює W , то на висоті тіло має потенціальну енергію W^n , яка визначається відрізком вертикалі, який обмежений точкою h на осі абсцис і графіком $W^n(h)$.

Графік залежності потенціальної енергії пружно-деформованого тіла від деформації має вигляд параболи (рис.3.2), де задана повна енергія W визначається горизонтальною прямою, а значення W^k і W^n задаються так само, як і на рис.3.1. Якщо кінетична енергія менше W , то тіло міститься в потенціальній ямі.

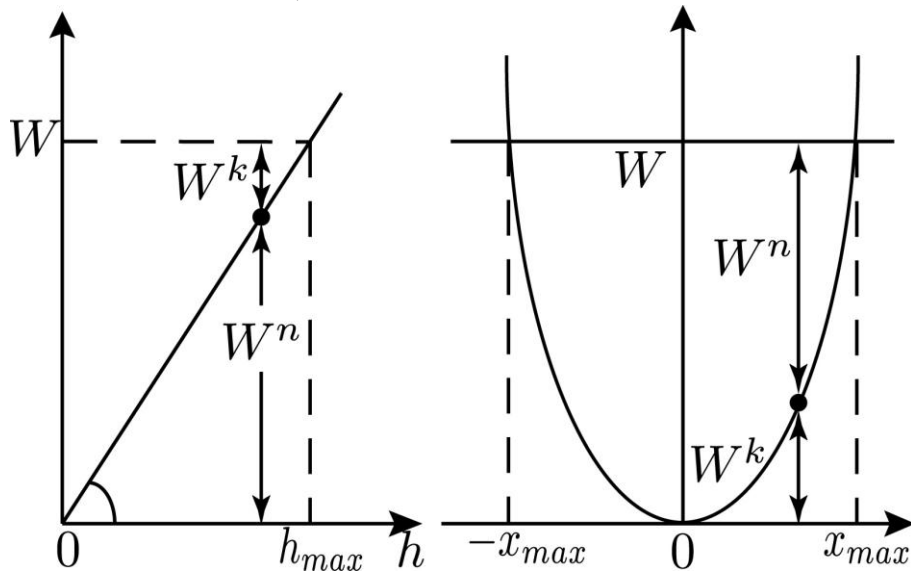


Рис.3.1

Рис.3.2

Експериментально доведено, що в механіці виконується закон збереження механічної енергії: *у замкненій механічній системі тіл, між якими діють тільки консервативні сили (сили пружності та гравітації), загальна (кінетична і потенціальна енергія) зберігається, тобто не змінюється з часом.* Математично закон записується так:

$$\frac{d(W^k + W^n)}{dt} = 0 \quad (W^k + W^n) = \text{const.} \quad (3.13)$$

3.4. Сили в механіці

Науці відомо чотири фундаментальних види взаємодії: гравітаційна, електромагнітна, слабка, сильна (ядерна). У механіці вивчають гравітаційну і електромагнітну взаємодії. Сили пружності, сили тертя, сили реакції опору, сили натягу мають електромагнітну природу.

Сила тяжіння – це сила, з якою тіла притягаються до Землі. Вона спрямована перпендикулярно до поверхні землі. Точка прикладання сили тяжіння – центр мас даного тіла (рис. 3.3).

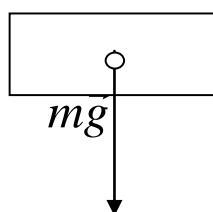


Рис.3.3

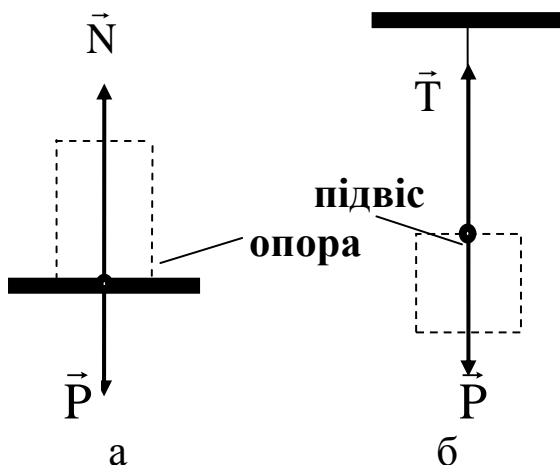


Рис 3.4

Рис 3.5

Вага тіла (P) – це сила, з якою тіло діє на опору або підвіс. Вона прикладена до опори або підвісу (рис. 3.4). На рис. 3.4,б показана дія тіла на підвіс (трос, нитка, канат), сили реакції опори \vec{N} і натягу підвісу \vec{T} . \vec{N} – **сила реакції опори** – це сила, що виникає при взаємодії тіла з опорою за третім

законом Ньютона. У цьому разі внаслідок притягнення тіла до Землі. Сила \vec{N} також діє перпендикулярно до опори (рис. 3.4,а).

Сила натягу (T або \vec{F}_H) – це сила, що виникає при взаємодії тіла з підвісом унаслідок притягнення тіла до Землі (рис. 3.4,б).

Тертям називається явище взаємодії дотичних тіл, що перешкоджає їхньому відносному переміщенню. Розрізняють **внутрішнє, зовнішнє і в'язке тертя**. Внутрішнє тертя – це тертя, яке виникає між частинами одного тіла. Внутрішнє тертя виникає, наприклад, при деформації твердих тіл. В'язке тертя з'являється при русі тіла в рідині або газі.

Сила зовнішнього тертя – це сила, що виникає при переміщенні одного тіла по поверхні іншого. Сила зовнішнього тертя

завжди спрямована у бік, протилежний напрямку руху тіла. Вона прямо пропорційна силі, з якою тіла притискуються одне до одного. Силу зовнішнього тертя обчислюють за формулою:

$$F_{тер} = \mu N, \quad (3.14)$$

де N – сила реакції опори; μ – коефіцієнт тертя.

Для коефіцієнтів тертя спокою, ковзання та кочення існують такі співвідношення:

$$\mu_{сп} > \mu_{ков} > \mu_{коч.}$$

Причина зовнішнього тертя – це шорсткість поверхні тіл, що взаємодіють, а також взаємодія між атомами дотичних тіл. Для зменшення тертя поверхню взаємодіючих тіл шліфують, полірують і змазують мастилами.

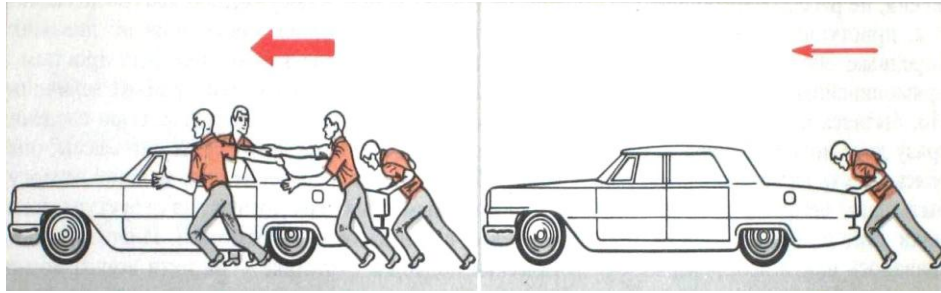
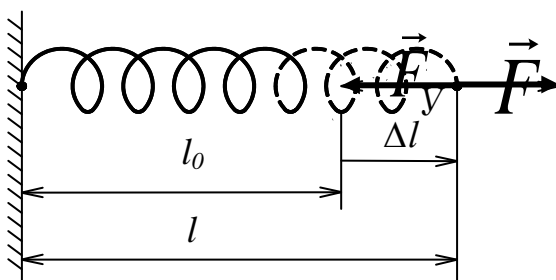


Рис.3.5

Деформація – це процес зміни розмірів і форми тіл під дією сили. Розглядають два види деформації: **деформація першого роду** має місце тоді, коли зовнішні сили діють перпендикулярно до поверхні, що деформується; **деформація другого роду** – зовнішні сили дотичні до поверхні, що деформується (деформація зсуву).



Якщо тіло приймає початкову форму і розміри після припинення дії сили \vec{F} , то **деформація – пружна**, а якщо форма тіла не відновлюється, то **деформація – пластична**.

Рис. 3.6

Мірою деформації ϵ є абсолютний зсув з положення рівноваги (подовження) $x = \Delta l = l - l_0$. При пружній деформації виникає **сила пружності** $\vec{F}_{пр}$ (рис. 3.6). Експерименти свідчать, що пружна деформація пропорційна силі пружності. Залежність між $\vec{F}_{пр}$ і пружною деформацією знайшов англійський вчений Гук: **сила пружності $\vec{F}_{пр}$ прямо пропорційна зсуву x і спрямована у бік, протилежний зсуву**. Запишемо формулу закону Гука:

$$\vec{F}_{пр} = -k\vec{x} \quad \text{або} \quad F_{пр} = kx, \quad (3.5)$$

де k – **коефіцієнт пружності** (жорсткості).

Коефіцієнт k – залежить від речовини, з якої виготовлено тіло і чисельно дорівнює силі, що потрібна для подовження тіла на одини-

цю довжини:

$$[k] = \frac{H}{m}.$$

При деформації (розтягуванні або стискуванні) стрижнів (рис.3.7) **закон Гука** записують у вигляді:

$$\sigma = \epsilon \cdot E, \quad (3.16)$$

де $\sigma = \frac{F}{S}$ – механічна напруга; S – площа перерізу стрижня;
 $\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$ – відносна деформація; E – модуль Юнга.

З формули (3.16) випливає, що модуль Юнга дорівнює механічній нарузі, при якій відносна деформація дорівнює одиниці ($\varepsilon = 1$):

$$E = \sigma.$$

При деформації зсуву (рис.3.8) шари тіла зміщуються паралельно площі зсуву і закон Гука записують у вигляді:

$$\sigma = \varphi \cdot G, \quad (3.17)$$

де σ – механічна напруга; $\varphi \approx \frac{BB^1}{AB}$ – відносна деформація;
 G – модуль зсуву.

Збільшення довжини при деформації розтягування (стискуванні) супроводжується зменшенням площі перерізу. Зміна форми тіла при деформації характеризується коефіцієнтом Пуассона μ :

$$\mu = \frac{\Delta d}{d} : \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (3.18)$$

де d – діаметр стрижня; Δd – зміна діаметра стрижня.

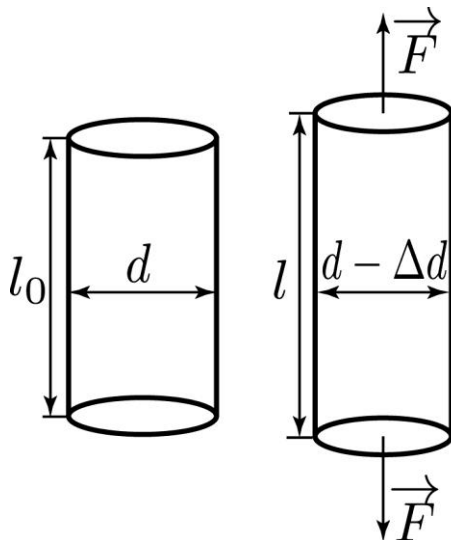


Рис. 3.7

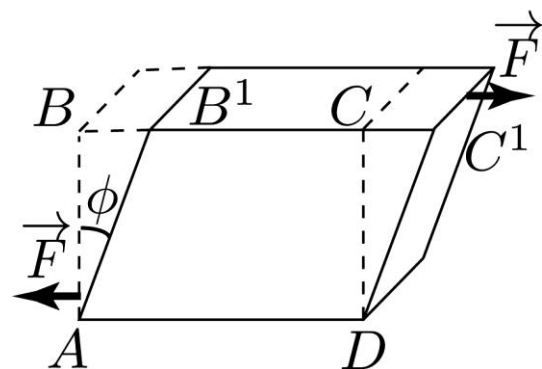


Рис.3.8

Модулі Юнга, зсуву і коефіцієнт Пуассона пов'язані між собою співвідношенням:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Контрольні запитання

1. Що таке енергія? Які види механічної енергії ви знаєте?
2. Сформулюйте і запишіть формулу теореми про зміну кінетичної енергії.
3. Що таке потенціальне поле?
4. Запишіть закон всесвітнього тяжіння.
5. Запишіть формули напруженості і потенціалу гравітаційного поля.
6. Чому дорівнює робота гравітаційного поля?
7. Чому дорівнює потенціальна енергія взаємодії двох тіл?
8. Чому дорівнює потенціальна енергія пружної деформації?
9. Сформулюйте закон збереження механічної енергії.
10. Який загальний зв'язок між силою і потенціальною енергією?
11. Які види сил у механіці ви знаєте?
12. Що таке сила тяжіння?
13. Що таке вага тіла?
14. Сформулюйте і запишіть формулу закону Гука.
15. Який фізичний зміст модуля Юнга?
16. Що таке коефіцієнт Пуассона?
17. Який зв'язок між модулями зсуву, Юнга і коефіцієнтом Пуассона?

4. ДИНАМІКА ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ

4.1. Момент сили

Нехай у деякій точці i твердого тіла прикладена сила F у площині, що перпендикулярна до осі обертання (рис. 4.1). **Моментом сили F відносно осі обертання називається векторний добуток радіуса-вектора на силу:**

$$\vec{M} = [\vec{r} \times \vec{F}]. \quad (4.1)$$

Розкриваючи формулу (3.19), можна записати модуль моменту сили:

$$M = Fr \sin \alpha, \quad (4.2)$$

де α – кут між векторами \vec{r} та \vec{F} ; $d = r \cdot \sin \alpha$ – плече сили. **Плече сили** – це найкоротша відстань між віссю обертання і лінією

дії сили. Якщо сила діє під кутом до площини обертання, то її можна розкласти на дві складові. Одна з них паралельна осі обертання і діє лише на підшипники.

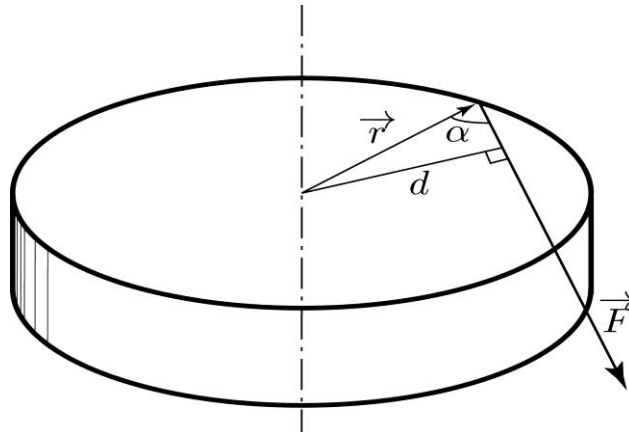


Рис.4.1

4.2. Момент інерції

Інертність тіла при обертальному русі залежить не тільки від маси, а й від її розподілу відносно осі обертання. Інертність тіла при обертанні характеризують моментом інерції відносно осі обертання.

Момент інерції J_i матеріальної точки i відносно осі обертання є скалярна фізична величина, яка дорівнює добутку маси на квадрат відстані її від осі:

$$J_i = m_i \cdot r_i^2. \quad (4.3)$$

Момент інерції твердого тіла i відносно осі обертання є сума моментів інерції матеріальних точок, з яких складається тіло:

$$J_m = \sum_{i=1}^n m_i \cdot r_i^2. \quad (4.4)$$

Момент інерції суцільного тіла визначають інтегруванням:

$$J_m = \int r^2 dn \quad (4.5)$$

Як приклад, визначимо момент інерції тонкого однорідного стрижня довжиною ℓ і масою m відносно осі, яка проходить через його середину (рис. 4.2). Виберемо маленьку ділянку стрижня довжиною $d\ell$ і масою dm , яка знаходиться на відстані x від осі 00^1 . Цю ділянку можна розглядати як матеріальну точку, тоді для її моменту інерції отримаємо:

$$J_i = x^2 \cdot dn \quad (4.6)$$

Маса елементарної ділянки дорівнює добутку лінійної густини

на довжину ділянки: $dm = \frac{m}{l} \cdot dx$ Тоді

$$dJ = \frac{m}{l} \cdot x^2 \cdot dx \quad (4.7)$$

Для знаходження моменту інерції стрижня проінтегруємо (4.7)

у межах від $-\frac{l}{2}$ до $\frac{l}{2}$:

$$J = \frac{m}{l} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} x^2 dx = \frac{m}{l} \left(\frac{x^3}{3} \right)_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} = \frac{m}{l} \left(\frac{l^3}{24} - \left(-\frac{l^3}{24}\right) \right) = \frac{m}{l} \cdot \frac{l^3}{12} = \frac{ml^2}{12} \quad (4.8)$$

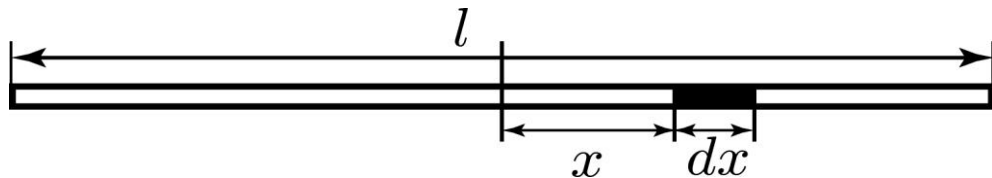


Рис.4.2

Моменти інерції геометричних тіл масою m :

1) суцільний однорідний циліндр чи диск:

$$J = \frac{mR^2}{12}; \quad (4.9)$$

2) однорідна куля:

$$J = \frac{2}{5}mR^2; \quad (4.10)$$

3) прямокутний паралелепіпед (відносно осі, що проходить через його центр):

$$J = \frac{1}{2}m(a^2 + b^2) \quad (4.11)$$

При визначенні моменту інерції тіла, що не проходить через центр мас, можна користуватися теоремою Штейнера. Згідно з теоремою, момент інерції тіла відносно осі, що не проходить через центр мас тіла J , дорівнює моменту інерції тіла відносно осі, що проходить

через його центр J_0 , плюс добуток маси на квадрат відстані b між паралельними осями:

$$J = J_0 + mb^2 \quad (4.12)$$

Одиниця моменту інерції – $(\text{кг} \cdot \text{м}^2)$.

4.3. Момент імпульсу

Моментом імпульсу L_i матеріальної точки i відносно осі обертання називається фізична величина, яка дорівнює векторному добутку радіуса-вектора на імпульс:

$$\vec{L}_i = [\vec{r}_i \times m\vec{v}_i] \quad (4.13)$$

Розкриваючи формулу (3.19), можна записати модуль моменту імпульсу матеріальної точки:

$$L_i = R_i m v_i \sin \alpha \quad (4.14)$$

де R_i – відстань до осі обертання; ω – кутова швидкість.

Момент імпульсу L тіла відносно осі обертання дорівнює сумі моментів імпульсів матеріальних точок, з яких складається тіло:

$$L = \sum_{i=1}^n J_i \omega = J \omega \quad (4.15)$$

де J – момент інерції тіла відносно осі обертання.

У векторній формі момент імпульсу:

$$\vec{L} = J \vec{\omega}.$$

Таким чином, момент імпульсу дорівнює добутку моменту інерції тіла на кутову швидкість.

4.4. Робота та кінетична енергія при обертальному русі

Робота зовнішньої сили при обертанні тіла на досить малий кут $d\varphi$:

$$dA = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i \cdot d\vec{s}_i = \sum_{i=1}^n F_i R_i d\varphi \quad (4.16)$$

де $d\vec{s}_i = R_i d\varphi$ – переміщення точки i ; R_i – радіус обертання точки i

(плече сили); $\sum_{i=1}^n \vec{r}_i \times \vec{F}_i$ момент зовнішніх сил.

Якщо положення радіуса-вектора змінилося від φ_1 до φ_2 , то роботу знаходять інтегруванням формули (4.16):

$$A = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M d\varphi \quad (4.17)$$

Кінетична енергія при обертанні тіла складається з кінетичної енергії окремих його точок:

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i v_i^2 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i r_i^2 \omega^2 = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (4.18)$$

Продиференціювавши формулу (4.18), одержимо елементарну зміну кінетичної енергії обертання:

$$dW = J \omega d\omega \quad (4.19)$$

Якщо тіло одночасно перебуває в прямолінійному і обертальному русі, то кінетична енергія визначається сумою енергій поступального і обертального рухів:

$$W = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} \quad (4.20)$$

4.5. Основний закон динаміки обертального руху. Закон збереження моменту імпульсу

Прирівнявши швидкість зміни кінетичної енергії (4.19) до елементарної роботи зовнішніх сил при обертанні тіла (4.16), отримаємо:

$$J\omega \frac{d\omega}{dt} = M \frac{d\varphi}{dt} \quad (4.21)$$

Скоротивши праву і ліву частини формули на $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$, отримаємо *основний закон динаміки обертального руху*:

$$J \frac{d\omega}{dt} = J \cdot \varepsilon = N \quad (4.22)$$

Момент інерції тіла – величина стала, тому з формули (4.22) випливає:

$$\frac{d(J\vec{\omega})}{dt} = \frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}. \quad (4.23)$$

У векторній формі формула основного закону (напрямки кутової швидкості і моменту сили збігаються) записується так:

$$J \cdot \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \vec{M} \quad (4.24)$$

Добуток моменту інерції тіла на кутове прискорення дорівнює моменту зовнішніх сил.

Якщо при обертанні тіла на нього не діють зовнішні сили, то момент сили дорівнює нулю. Тоді отримуємо закон збереження моменту імпульсу: **момент імпульсу тіла залишається постійним, якщо момент зовнішніх сил, які діють на нього, дорівнює нулю:**

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt} = 0, \quad \vec{L} = J\vec{\omega} = \text{const}. \quad (4.25)$$

4.6. Вільні осі обертання. Гіроскопи

Якщо сили, що діють на вісь обертання, врівноважуються, а вісь проходить через центр мас, то її напрямок зберігається у просторі. Осі обертання, які зберігають свій напрямок у просторі, називаються вільними осями інерції. У будь-якого тіла є три взаємно перпендикулярні (головні) осі інерції. Властивість тіл зберігати свою орієнтацію у просторі застосовують у гіроскопах. Гіроскоп – масивне симетричне тіло, що обертається навколо осі з великою швидкістю. Гіроскопи застосовуються в навігаційних приладах (гірокомпас, авіагоризонт), для підтримки заданого напрямку руху (авторуль на судні, автопілот), при орієнтації космічних кораблів.

Таблиця 5.1

Аналогія формул поступального та обертального рухів

| Кінематичні характеристики | |
|----------------------------|--|
| Поступальний рух | Обертальний рух |
| $x = f(t)$ | $\varphi = f(t)$ |
| $\Delta x = x_2 - x_1$ | $\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ |

| | |
|---|---|
| $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}; v = \frac{dx}{dt}$ | $\omega = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}; \omega = \frac{d\varphi}{dt}$ |
| $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}; \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ | $\varepsilon = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}; \vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$ |
| <i>Формули рівномірного руху</i> | |
| $\vec{a} = 0, v = const$ | $\vec{\varepsilon} = 0, \omega = const$ |
| <i>Формули рівнозмірного руху</i> | |
| $a = const; v = v_0 \pm at;$ $x = x_0 + v_0 t \pm \frac{at^2}{2}$ | $\varepsilon = const; \omega = \omega_0 \pm \varepsilon t;$ $\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t \pm \frac{\varepsilon t^2}{2}$ |
| <i>Основні динамічні характеристики</i> | |
| сила – \vec{F} | момент сили – $\vec{M} = rF \sin \alpha$ |
| маса – m | момент інерції – $I = \sum m_i r_i^2$ |
| імпульс тіла – $\vec{p} = m\vec{v}$ | модуль моменту імпульсу: $L = r \cdot p \sin \alpha$ |
| <i>Основний закон динаміки</i> | |
| $\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}, \vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ | $\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}, \vec{\varepsilon} = \frac{\vec{M}}{I}$ |
| <i>Робота і енергія</i> | |
| $A = \int_1^2 F ds = \int_1^2 F_r dr$ $W^{kin} = \frac{mv^2}{2};$ $W^{pm} = mgh, W^{pm} = \frac{kx^2}{2}$ | $A = \int_1^2 M d\varphi = \int_1^2 I \varepsilon d\varphi$ $W^{kin} = \frac{I\omega^2}{2}$ |

Контрольні запитання

1. Що називається моментом сили? Запишіть формулу.
2. Що називається моментом інерції?
3. Запишіть формули моментів інерції кулі, диска, стрижня.
4. Сформулюйте і запишіть формулу теореми Штейнера про перенос осі інерції.
5. Що називається моментом імпульсу?

6. Сформулюйте і запишіть формулу основного закону динаміки обертального руху.
7. Чому дорівнює робота і кінетична енергія обертального руху тіла?
8. Сформулюйте і запишіть формулу закону збереження моменту імпульсу.
9. Що називається вільною віссю обертання?
10. Що таке гіроскоп? Де використовують гіроскопічні прилади?

5. ЕЛЕМЕНТИ МЕХАНІКИ РІДИН І ГАЗІВ

5.1. Потік рідини. Рівняння нерозривності

Особливістю рідини і газу є рухливість їх молекул. Унаслідок цього рідина і газ легко змінюють свою форму. У механіці рідину і газ розглядають як суцільне, неперервне середовище. Фізична величина, яка дорівнює відношенню нормальної сили, що діє з боку рідини на деяку площу, до цієї площі, називається тиском рідини:

$$p = \frac{F_n}{S}. \quad (5.1)$$

Згідно із законом Паскаля, тиск у будь-якому місці нерухомої рідини передається у всіх напрямках однаково. Тиск стовпа рідини (гідростатичний тиск) визначається тільки його висотою: $p = \rho gh$, де ρ – густина рідини; g – прискорення вільного падіння.

Сила тиску на нижні шари рідини більша, ніж на верхні, тому на тіло, яке занурене у рідину або газ, діє спрямована вгору сила, яка дорівнює вазі витісненої тілом рідини або газу (закон Архімеда):

$$F_A = \rho g V, \quad (5.2)$$

де V – об'єм тіла.

Потік рідини (газу), в якому поле швидкостей з часом залишається незмінним, називається **стаціонарним**. Потік рідини графічно зображують лініями потоку (рис. 5). Густина ліній потоку пропорційна швидкості частинок в усіх місцях потоку, а їх швидкості дотичні до ліній потоку. Частину рідини або газу, обмежену лініями потоку, називають **трубкою потоку**. Існує два типи течії рідини або газу:

- 1) **ламінарна течія** – рідина (газ), що розділяється на шари (трубки потоку), які не перемішуються;

2) **турбулентна течія** - шари рідини (газу) перемішуються.

Англійський вчений Рейнольдс (1842 – 1912) довів, що характер течії (перехід від ламінарної до турбулентної течії) залежить від безрозмірної величини (числа Рейнольдса):

$$R_e = \frac{\rho v D}{\eta}, \quad (5.3)$$

де ρ – густина рідини або газу; D – характерний лінійний розмір, наприклад, діаметр труби; v – середня за перетином швидкість; η – динамічна в'язкість.

Для малих значень числа R_e ($R_e \leq 1000$) спостерігається ламінарна течія, при ($1000 \leq R_e \leq 2000$) – перехід від ламінарної до турбулентної течії, при $R_e \geq 2300$ – турбулентна течія. Англійський фізик Стокс (1819 – 1903) встановив, що при малих швидкостях руху ($R_e \leq 1000$) сила опору пропорційна динамічній в'язкості та швидкості. Так, сила опору рухові кулі в рідині становить:

$$F = 6\pi r \eta v, \quad (5.4)$$

де r – радіус кулі; v – швидкість кулі.

Визначимо об'єм (потік) рідини (m^3/c), що перетинає деяку елементарну площадку dS за одну секунду:

$$dQ = v \cdot dS_0 \cdot \cos \alpha, \quad (5.5)$$

де v – швидкість рідини; dS_0 – площадка, яка розташована нормально до швидкості; α – кут між вектором швидкості і нормаллю до площадки dS (рис. 5.1.).

Повний потік знайдемо, проінтегрувавши елементарний потік за всією площею перерізу:

$$Q = \int_S v \cdot d\vec{S} \cdot \cos \alpha, \quad (5.6)$$

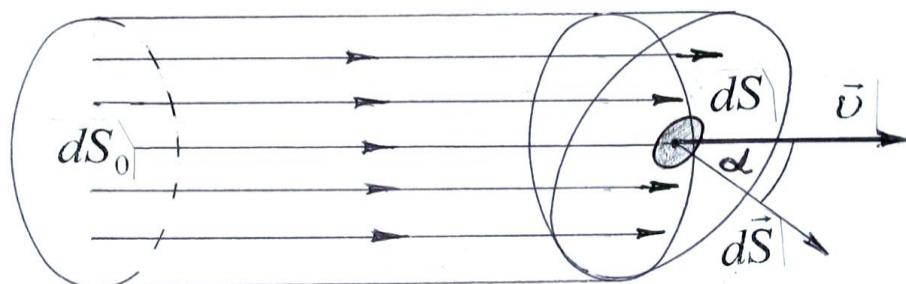


Рис.5.1

Пуазейль довів, що для ламінарної течії потік рідини у трубах пропорційний до перепаду тиску $(p_1 - p_2)$ на одиниці довжини l труби, четвертому степені радіуса труби R і обернено пропорційний до коефіцієнта в'язкості рідини:

$$\Phi = \frac{\pi R^4 (p_1 - p_2)}{8\eta l} \quad (5.7)$$

За формулами (5.4) і (5.7), пропускаючи рідину або газ через капіляр відомого радіуса і вимірюючи перепад тиску і потік Φ , можна знайти в'язкість η .

При стаціонарній течії маса рідини або газу, що протікає через будь-який поперечний переріз потоку за одну секунду, однакова, тому:

$$\rho_1 v_1 S_1 = \rho_2 v_2 S_2 \quad (5.7)$$

де ρ – густина; v – швидкість течії.

У стаціонарному потоці змінами густини не тільки рідини, а й газу можна знехтувати, тому:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 \quad (5.8)$$

Рівняння (5.8) становить *теорему про нерозривність потоку рідини або газу*. З теорему випливає, що в тих місцях, де трубка ширша, швидкість потоку менша, і навпаки (рис.5.2).

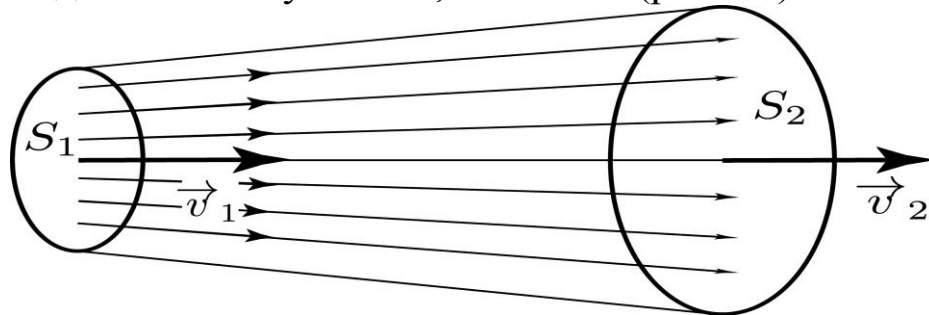


Рис.5.2

5.2. Тиск у рідині та газі. Рівняння Бернуллі

Рідини і газу перебувають під тиском, який створюється силою тяжіння або насосами. Для стаціонарного потоку ідеальної (нев'язкої і нестисливої) рідини виконується рівняння Бернуллі (1700 – 1782):

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho g h + p = \text{const} \quad (5.9)$$

де $\frac{\rho v^2}{2} = p_d$ – динамічний тиск; $\rho gh = p_z$ – гідростатичний тиск;

P – статичний тиск.

Якщо потік горизонтальний, то рівняння набуває такого вигляду:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + P_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + P_2 \quad (5.10)$$

З формули (5.10) видно, що там, де швидкість більша, статичний тиск P менше і навпаки. Зниження тиску при збільшенні швидкості використовують в інжекторах, пульверизаторах, масляних дифузійних вакуумних насосах тощо. Для вимірювання швидкості рідини чи газу використовують **трубку Піто**. Цей прилад має дві трубки (одну з отвором, паралельним потоку, і другу з отвором, перпендикулярним потоку), які з'єднані з диференціальним манометром (рис. 5.3). З рівняння Бернуллі випливає:

$$\frac{\rho v^2}{2} = P_1 - P_2; \quad v = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}, \quad (5.11)$$

де ρ – густина рідини або газу; $(P_1 - P_2)$ – різниця статичних тисків, яка виміряється манометром або за різницею висот $(P_1 - P_2) = \rho g h$

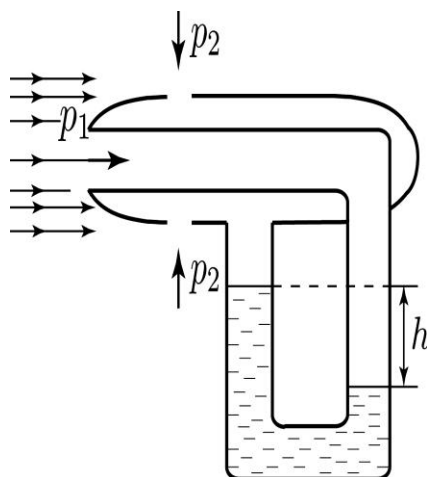


Рис.5.3

Аерація ґрунту. Нехай вітер дує перпендикулярно до напрямку борозен зораного поля. Наявність борозен відбивається на характері повітряного потоку: приземний шар повітря змінного перетину обмежений поверхнею землі і найближчою горизонтальною поверхнею, яка утворена незбуреним потоком (рис.5.4). Відповідно до рівняння (5.8) і (5.10) тиск повітря над борознами буде більший, ніж над горбиками. У поверхневому шарі ґрунту виникає рух повітря, який

спрямований від основ борозен до вершин горбиків. Аерація збагачує ґрунт киснем, а приземне повітря – вуглекислотою, сприяючи росту рослин. При великій швидкості вітру рух повітря в ґрунті спричиняє руйнування частинок і сприяє створенню дрібногрудкуватої структури ґрунту.

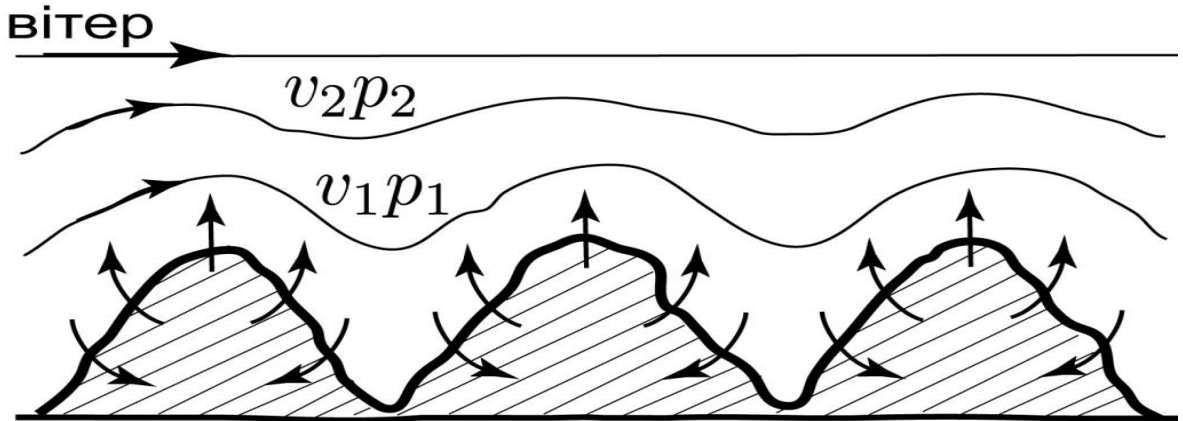


Рис.5.4

Контрольні запитання

1. Сформулюйте і запишіть формулу закону Паскаля.
2. Сформулюйте і запишіть формулу закону Архімеда.
3. Які види течії ви знаєте?
4. Який фізичний зміст числа Рейнольда?
5. Запишіть формулу Стокса.
6. Як визначити потік рідини?
7. Сформулюйте теорему про неперервність потоку.
8. Запишіть формулу Пуазейля.
8. Дайте визначення статичного, гідростатичного, динамічного тиску.
9. Що таке трубка Піто?
10. Запишіть формулу Бернуллі.
11. Поясніть процес аерації ґрунту.

6. ОСНОВИ МОЛЕКУЛЯРНОЇ ФІЗИКИ

Основні положення молекулярно-кінетичної теорії (МКТ), ідеальний газ, основне рівняння МКТ ідеального газу, ізопроцеси у газах, рівняння Менделєєва-Клапейрона.

6.1. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії речовини

Молекулярна фізика – це розділ фізики, у якому вивчають властивості речовини з урахуванням характеристик дрібних частинок (атомів і молекул).

Молекулярно-кінетична теорія (МКТ) – це наукова теорія, що пояснює фізичні властивості речовини на основі молекулярної будови, взаємодії і руху дрібних частинок (молекул і атомів).

Основні положення молекулярно-кінетичної теорії:

- усі тіла складаються з дрібних частинок (молекул і атомів);
- частинки перебувають у безперервному хаотичному русі;
- між частинками будь-якої речовини діють сили взаємодії.

Атомом називається найменша частинка даного хімічного елемента. Молекулою називається найменша стійка частинка даної речовини, що має його основні хімічні властивості. Молекула може складатися з одного або декількох атомів.

Кожна речовина характеризується молярною масою M , що визначається за допомогою таблиці хімічних елементів Менделєєва.

Наприклад:

$Fe: M = 64 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; $CO_2: M = 44 \cdot 10^{-3}$ кг/моль
 $N_2: M = 28 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; $H_2O: M = 18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Одиницею кількості речовини є моль. **Моль – це кількість однорідної речовини, що містить стільки ж атомів або молекул, скільки утримується атомів у 0,012 кг вуглецю.** Число атомів або молекул, що містить один моль речовини, називається числом Авогадро $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹. Кількість речовини (число молей ν) можна визначити за формулою:

$$\nu = \frac{m}{M} = \frac{V}{V_\mu} = \frac{N}{N_A}; \quad (6.1)$$

де m , V – маса і об'єм речовини; V_μ – молярний об'єм; M – маса моля; N – число атомів або молекул; N_A – число Авогадро.



Рис. 6.1 Броунівський рух – це безперервний хаотичний рух твердих часток у рідині (або газу) під дією ударів молекул (рис. 6.1).

Ще одним доказом руху частинок речовини є дифузія. **Дифузія** – це фізичне явище, при якому молекули (або атоми) однієї речовини проходять між молекулами (або атомами) іншої речовини і навпаки

(взаємна дифузія). Дифузія спостерігається в газоподібних, рідких і твердих речовинах. Дифузія зростає з підвищенням температури.

Середній розмір атомів (діаметр) дуже малий: $\langle d \rangle \approx 3 \cdot 10^{-10}$ м. Сили $F(r)$ взаємодії між частинками виявляються на дуже малих r відстанях порівняно з лінійними розмірами атомів. Міжмолекулярні сили короткодійчі – вони діють між сусідніми молекулами і швидко зменшуються зі збільшенням відстані між молекулами.

Рух молекул газів, рідин і твердих тіл

У газах середня відстань між молекулами набагато більша, ніж розміри молекул газу. Взаємного притягання між молекулами газу фактично немає. Молекули газу рухаються рівномірно і прямолінійно від зіткнення до зіткнення з іншими молекулами. При ударі змінюється напрямок і величина швидкості. Якщо молекули газу складаються з декількох атомів, то при зіткненні вони набувають ще й обертального руху. Таким чином **тепловий рух молекул газу поступальний і обертальний**.

У рідинах молекули якийсь час перебувають у рівновазі, де вони коливаються, а потім переходять у нове положення рівноваги і т.д. Отже, тепловий рух молекул рідин в основному **коливальний**, а також **поступальний**.

У твердих тілах тепловий рух молекул – **коливальний**, але інколи молекули у твердих тілах можуть переходити з одного положення рівноваги в інше.

Властивості великої кількості молекул відрізняються від властивостей окремих молекул, тому при дослідженні таких систем використовується молекулярно-кінетичний (статистичний) і термодинамічний методи.

6.2. Ідеальний газ. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії (МКТ) ідеального газу

Молекули реального газу мають кінетичну і потенціальну енергію. У деяких випадках потенціальною енергією молекул зневажають.

Ідеальний газ – модель газу, у якій не враховують розміри молекул та їхню взаємодію на відстані. Реальні гази при не дуже низьких температурах і малих тисках за своїми властивостями близькі до

ідеального газу. Молекули газу рухаються хаотично. Зіштовхуючись зі стінками посудини, вони створюють тиск p :

$$p = \frac{F}{S}, \quad (6.1)$$

де F – сумарна сила ударів усіх молекул об стінки посудини;
 S – площа поверхні посудини (балона).

З основних положень МКТ можна одержати основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу. Основне рівняння МКТ ідеального газу пов'язує параметри стану термодинамічної системи (p, V) з характеристиками молекул:

$$p = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m_0 \overline{v_{kv}^2}, \quad (6.2)$$

де N – число молекул в об'ємі V ; m_0 – маса молекули; v_{kv} – середня квадратична швидкість молекул. У рівнянні (6.2) відношення

$$\frac{N}{V} = n$$

– концентрація молекул. З огляду на те, що середня кінетична

енергія молекул газу $E_{kin} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$, з рівняння (6.2) одержимо формулу тиску ідеального газу:

$$p = \frac{2}{3} n E_k, \quad (6.3)$$

де E_k – середня кінетична енергія молекул газу.

Експерименти показали, що в стані термодинамічної (теплової)

рівноваги для будь-яких газів $\frac{pV}{N} = const$. Тоді:

$$\frac{pV}{N} = \frac{1}{3} m_0 \overline{v_{kv}^2} \quad (6.4)$$

Отже, відношення $\frac{pV}{N} = const$ характеризує стан теплової (термодинамічної) рівноваги. Розмірність цієї величини – Джоуль.

Введемо новий параметр T – абсолютну температуру, тоді:

$$\frac{2}{3}nE_k = kT, \quad (6.5)$$

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

З формули (6.5) видно, що середня кінетична енергія одноатомних молекул газу:

$$E_k = \frac{m_0 \bar{v}_{kq}^2}{2} = \frac{3}{2}kT. \quad (6.6)$$

З формули (6.6) одержимо формулу для середньої квадратичної швидкості поступального руху молекул ідеального газу:

$$\bar{v}_{kq} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3R}{M}} \quad (6.7)$$

де $R = kN_A$ – універсальна газова стала; \bar{v}_{kq} – середня квадратична швидкість; m_0 – маса молекули; M – молярна маса:

$$\bar{v}_{kq} = \sqrt{\frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot T}{m_0}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 8,31 \cdot T}{M}}$$

Фізичні процеси, які відбуваються при нагріванні або охолодженні тіл, зміні їхнього агрегатного стану, називають *тепловими явищами*. Теплова (термодинамічна) рівновага системи характеризується *температурою*.

Температура – фізичний параметр, що характеризує тіла в стані теплової рівноваги. У стані теплової рівноваги температура всіх тіл однакова.

З формули (6.6) видно, що **абсолютна температура – це кількісна міра кінетичної енергії руху молекул (або атомів)**. Для вимірювання температури застосовують прилад, що називається термометром.

У побуті для вимірювання температури використовують шкалу Цельсія – міжнародну практичну шкалу. Сота частина шкали Цельсія між 0°C и 100°C називається *градусом*. Порівнюючи температурні шкали, одержимо формулу:

$$T = t^{\circ}\text{C} + 273^{\circ}, \quad (6.8)$$

де T – температура в градусах Кельвіна; $t^{\circ}\text{C}$ – температура в градусах Цельсія. На шкалі Кельвіна всі температури позитивні, тому що відлік температур ведеться від нуля – 0K .

6.3. Ізопроееси у газах

Термодинамічною системою називається будь-яка фізична система, яка складається з великого числа атомів і молекул, які здійснюють неупорядкований тепловий рух і, взаємодіючи між собою, обмінюються енергією. Будь-яка зміна в термодинамічній системі, яка пов'язана із зміною хоча б одного з термодинамічних параметрів (p , V , T) стану системи, називається **термодинамічним процесом**.

Ізопроеесами у газах називають термодинамічні процеси, які відбуваються при постійному значенні одного з параметрів стану системи (p , V , T). **Рівноважними (квазістатичними)** називаються такі процеси, під час яких зміна стану системи відбувається дуже повільно і система проходить неперервний ряд нескінченно близьких рівноважних термодинамічних станів, тобто час переходу значно більше часу релаксації системи. **Нестатичними** називаються такі процеси, під час яких час переходу значно менше часу релаксації системи. Розглянемо закони ідеального газу, які були отримані дослідним шляхом.

Ізотермічний процес – це процес, що відбувається при постійній температурі $T = \text{const}$ (рис. 6.2). Бойль і Маріотт (Р. Бойль (1627 – 1691), Маріотт (1620 – 1684) довели, що **для даної маси газу (m) при постійній температурі (T) добуток тиску на об'єм є величина стала**. У цьому процесі параметри p і V змінюються обернено пропорційно:

$$pV = \text{const} \quad (6.9)$$

Ізобаричний процес у газах – це процес, що відбувається при постійному тиску ($p = \text{const}$) (рис. 6.3). У цьому процесі параметри V і T змінюються прямо пропорційно,

Гей-Люссак довів, що в ізобарному процесі ($p = \text{const}$) **для даної маси газу при постійному тиску об'єм газу змінюється пропорційно до температури**:

$$V = V_0(1 + \alpha \Delta T) \quad (6.10)$$

де V_0 – об'єм газу при нормальній температурі; α – температурний коефіцієнт об'ємного розширення.

Виявилось, що для всіх газів він дорівнює $\frac{1}{273} \text{град}^{-1}$. У 1848 р. Уільям Томсон (1824–1907) ввів поняття абсолютної температури $T \in 273^{\circ}\text{C}; T_0 = 27\text{K}$.

$$V \propto T \quad (6.11)$$

Тоді закон Гей-Люссака формулюється так: *для даної маси газу при постійному тиску відношення об'єму до температури є величиною сталою*:

$$\frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0} = \text{const.} \quad (6.12)$$

При ізохорному процесі ($V = \text{const}$) ідеальний газ підпорядковується закону Шарля (1746-1823): *для даної маси газу при постійному об'ємі відношення тиску до температури є величиною сталою*:

$$\frac{P}{T} = \text{const.} \quad (6.13)$$

Графіки ізопроцесів показані на рис. 6.2, 6.3, 6.4.

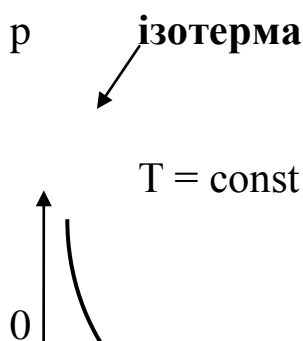


Рис. 6.2

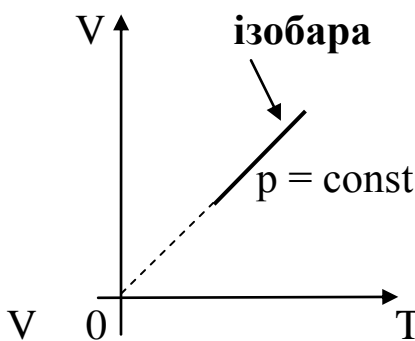


Рис. 6.3

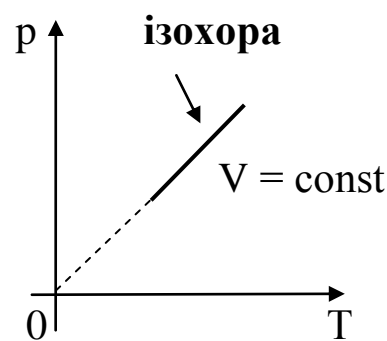


Рис. 6.4

На рис. 6.3 і 6.4 графіки починаються пунктирними лініями, тому що газу при низьких температурах, близьких до абсолютного нуля, перебувають у рідкому або твердому стані.

Абсолютний нуль – це температура, при якій тиск газу стає рівним нулю, тому що припиняється поступальний і обертовий рух молекул газу, але залишаються так звані «нульові» коливання молекул речовини.

6.4. Рівняння Менделєєва-Клапейрона

Рівняння стану ідеального газу (рівняння Клапейрона) зв'язує всі макроскопічні параметри термодинамічної системи:

$$\frac{pV}{T} = \text{const.} \quad (6.14)$$

Запишемо тиск газу через концентрацію n , середню кінетичну енергію молекул ідеального газу і температуру:

$$p = n \cdot \frac{2}{3} \overline{E_k} = \frac{2}{3} n \cdot \frac{3}{2} kT \quad (6.15)$$

де число молекул $N = \nu \cdot N_A$; число молів ν ; m – маса газу. Тиск ідеального газу:

$$p = \frac{\nu N_A \cdot kT}{V} \quad (6.16)$$

Підставивши у формулу (6.16) універсальну газову сталу $R = kN_A$, одержимо *рівняння стану ідеального газу*:

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad (6.17)$$

Це рівняння отримало назву рівняння Менделєєва-Клапейрона. Воно об'єднує експериментальні газові закони: Бойля-Маріотта, Гей-Люссака та Шарля.

6.5. Закон Дальтона

Англійський фізик Джон Дальтон відкрив закон, що був названий його ім'ям: *тиск суміші газів дорівнює сумі парціальних тисків газів, які входять до складу газу:*

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_N \quad (6.18)$$

де p_1, p_2, \dots, p_N – парціальні тиски суміші газів.

6.6. Вологість повітря

Абсолютною вологістю повітря називається густина ρ водяної пари у повітрі за даної температури: $[\rho]=\text{г/м}^3$.

Відносною вологістю повітря φ називається відношення абсолютної вологості ρ до густини водяної пари ρ_H , яка необхідна для насичення повітря за даної температури:

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_H} \cdot 100\% \quad (6.19)$$

Відносну вологість виражають у відсотках (%).

У метеорології відносну вологість визначають через відношення тисків:

$$\varphi = \frac{P}{P_H} \cdot 100\% \quad (6.20)$$

де P – тиск водяної пари, що перебуває в повітрі; P_H – тиск пари, що насичував би повітря при даній температурі.

Точкою роси називається температура, при якій водяні пари, що не насичували раніше повітря, стають такими, що насичують.

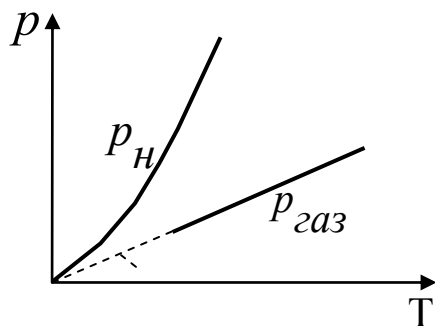


Рис. 6.5

Тиск насиченої пари P_H залежить від температури і не залежить від вільного від рідини об'єму посудини. Тиск насиченої пари зростає зі збільшенням його температури. На рис. 6.5 зображені графіки залежності тиску насиченої пари (P_H) та ідеального газу ($P_{газ}$) залежно від температури пару або газу.

Контрольні запитання

1. Сформулюйте основні положення МКТ.
2. Що називається атомом, молекулою?
3. Чому дорівнює молярна маса речовин: N, H, C, S, O_2 ?
4. Запишіть формулу для обчислення кількості речовини.
5. Що називається числом Авогадро?

6. Як обчислити масу молекули через її молярну масу?
7. Який рух називають броунівським?
8. Який газ називається ідеальним?
9. Запишіть формули середньої кінетичної енергії молекули газу.
10. Що називається термодинамічною температурою?
11. Який зв'язок між температурами за шкалою Цельсія і за шкалою Кельвіна?
12. Запишіть основне рівняння МКТ.
13. Які процеси називаються квазістатичними, нестатичними?
14. Які ізопроееси в газах ви знаєте?
15. Сформулюйте і запишіть формули ізопроеесів.
16. Запишіть рівняння Менделєєва - Клапейрона.
17. Сформулюйте закон Дальтона.
18. Що називається абсолютною і відносною вологістю повітря?
19. Запишіть формулу відносної вологості повітря.
20. Що називається точкою роси?

7. ОСНОВИ КЛАСИЧНОЇ СТАТИСТИКИ. ЯВИЩА ПЕРЕНОСУ

7.1. Розподіл Максвелла. Швидкості молекул газу

Експерименти показали, що в результаті хаотичного руху і зіткнень молекули набувають різних швидкостей. Користуючись законами статистичної фізики і теорії ймовірностей, Д. Максвелл (1831 – 1879) отримав формулу для розподілу швидкостей газу:

$$dN(v) = N f(v) dv \quad (7.1)$$


де $dN(v)$ – число молекул, швидкості яких лежать у границях v і $v + dv$; N – загальне число молекул; $f(v)$ – функція розподілу молекул за швидкостями.

Графік функції $f(v)$ наведено на рис.7.1. З графіка випливає, що число молекул, які мають дуже великі або дуже малі швидкості, незначне.

Найбільш ймовірну швидкість v_{ii} , яку має більша частина молекул, можна визначити, прирівнявши похідну від функції розподілу за

швидкістю до нуля $\frac{df(v)}{dv} = 0$, звідки отримаємо:

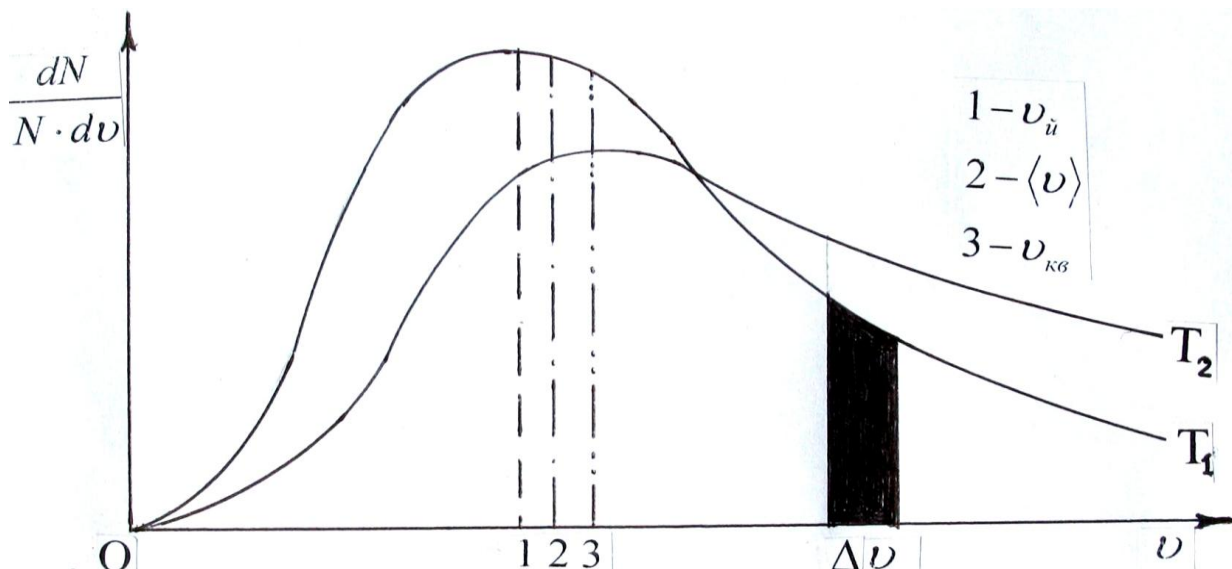


Рис. 7.1

$$v_{ii} = \sqrt{\frac{2kTR}{m}} \sqrt{\frac{R}{M}} \quad (7.2)$$

Середню арифметичну швидкість можна знайти діленням суми швидкостей всіх молекул на їх загальне число:

$$\langle v \rangle = \frac{\int_0^{\infty} v f(v) dv}{\int_0^{\infty} f(v) dv} \quad (7.3)$$

Підставивши в формулу (7.1) функцію розподілу, після інтегрування отримаємо:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kTR}{\pi m}} \sqrt{\frac{R}{M}} \quad (7.4)$$

Визначені дослідним шляхом швидкості молекул газів та парів металів підтвердили закон розподілу молекул за швидкостями.

7.2. Барометрична формула. Розподіл Больцмана

Завдяки гравітаційному полю Землі й тепловому рухові концентрація молекул і тиск повітря зменшуються з висотою. Розглянемо розподіл молекул повітря залежно від висоти за умови, що повітря – ідеальний газ, температура якого не змінюється з висотою. Виберемо на висоті h над поверхнею землі шар повітря у формі циліндра висотою dh і площею основи S (рис.7.2).

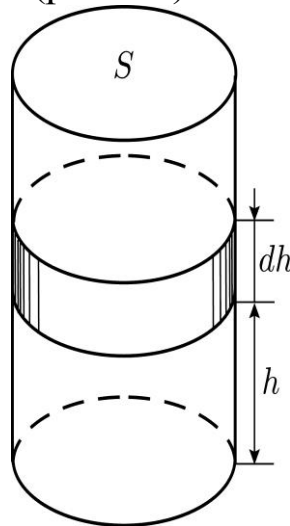


Рис.7.2

Тиск тонкого шару повітря висотою dh :

$$dp = -\rho g dh \quad (7.5)$$

де густина $\rho = \frac{m}{V} = \frac{M}{RT}$; M – молярна маса; R – газова стала.

Після нескладних перетворень отримаємо:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{Mg}{RT} dh \quad (7.6)$$

Проінтегруємо формулу (7.6):

$$\int_p^P \frac{dp}{p} = -\int_0^h \frac{Mg}{RT} dh \quad (7.7)$$

Після інтегрування отримаємо так звану барометричну формулу

$$p = p_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}} \quad (7.8)$$

Замінивши $M = m_0 \cdot N_A$ і $R = k \cdot N_A$, отримаємо розподіл Больцмана частинок залежно від потенціальної енергії:

$$\frac{ngh}{kT} = \frac{W}{kT} \quad (7.9)$$

На рис.7.3 наведений теоретичний розподіл молекул водню, гелію і кисню за висотою в гравітаційному полі Землі. Сильні вітри у високих шарах атмосфери, які супроводжуються турбулентним рухом повітря, приводить до того, що відсотковий склад повітря до висоти майже 500 км не змінюється. Розподіл Больцмана задовільно описує також розподіл пилу в атмосфері в безвітряну погоду.

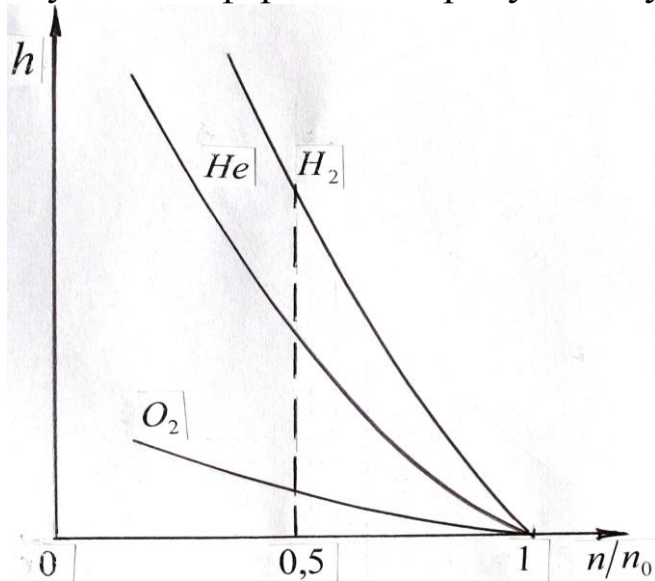


Рис. 7.3

На висотах 20 – 50 км під дією ультрафіолетового випромінювання Сонця молекули кисню розділяються на атоми і молекули озону O_3 , який поглинає ультрафіолетову сонячну радіацію.

У холодильній техніці, рефрижераторах, аерозольних упаковках використовуються фтористі насичені вуглеводи (фреони). Відповідно до розподілу Больцмана вони також знаходяться на висотах разом з озоном і руйнують його. Це приводить до розширення «озонових дір», тому Міжнародною спільнотою прийнятий Монреальський протокол про речовини, які руйнують озоновий шар.

Формула (6.29) лежить в основі *метода седиментації* – вимірювання швидкості осідання частинок у в'язкій рідині, наприклад, компонент крові, аерозолів у повітрі та ін.

7.3. Середня довжина вільного пробігу молекул газу

Молекули газу, які рухаються хаотично, зіштовхуються між собою, проходячи різні відстані між зіткненнями. Середню довжину вільного пробігу молекул між зіткненнями знайдемо поділивши середню швидкість на середнє число зіткнень:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle z \rangle}. \quad (7.10)$$

Для визначення $\langle z \rangle$ прийнемо, що молекула радіусом r рухається, а інші перебувають у стані спокою. Рухаючись, ця молекула зіткнеться з тими молекулами, центри яких лежать на віддаленні менше $2r = d$ від напрямку руху (рис 7.4). Таким чином, рухома молекула може зіткнутися з молекулами, які знаходяться в об'ємі циліндра $4\pi r^2 \langle v \rangle$, де $\langle v \rangle$ – середня відстань, яку молекула проходить за іс. Число зіткнень:

~~$$\langle z \rangle = \sqrt{2} n d \langle v \rangle \quad (7.11)$$~~

де n – концентрація молекул; $\sqrt{2}$ – коефіцієнт, який враховує рух інших молекул; d – ефективний діаметр молекули – мінімальна відстань, на яку можуть наближатися молекули при зіткненні.

Підставивши (7.11) у формулу (7.12) для середньої довжини вільного пробігу, отримаємо:

~~$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\sqrt{2} n d \langle v \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2} n d} \quad (7.12)$$~~

Залежність середньої довжини вільного пробігу від тиску і температури можна отримати за допомогою формули $p = nkT$.

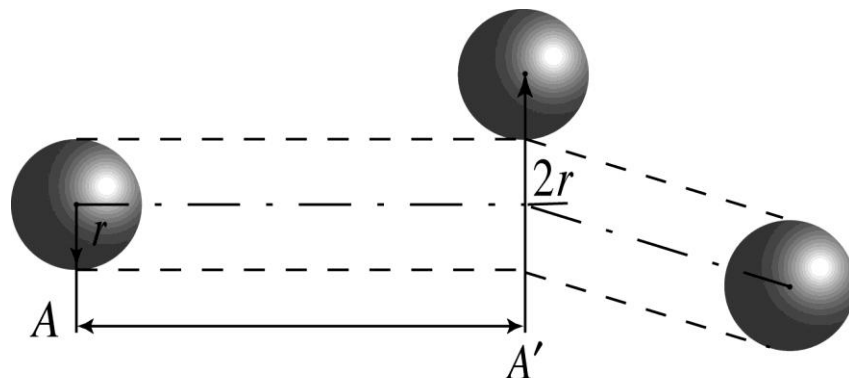


Рис. 7.4

7.4. Явища переносу

Хаотичний рух молекул і їх зіткнення приводять до виникнення явищ, які супроводжуються перенесенням маси (дифузія), теплової енергії (теплопровідність), імпульсу (в'язке тертя).

7.4.1. Теплопровідність. Закон Фур'є

Теплопровідність – це властивість речовини проводити тепло шляхом теплопередачі. Передача тепла здійснюється шляхом:
 а) конвекції (механічного перемішування); б) електромагнітного випромінювання; в) теплопередачі (теплообміну). Процес теплопередачі описується законом Фур'є: *кількість теплоти ΔQ , перенесеної від гарячого шару з температурою T_1 до холодного шару з температурою T_2 , пропорційна градієнту температур, площі контактуючих шарів S і часу* (рис.7.5):

$$\Delta Q = \kappa \frac{dT}{dx} S \Delta t \quad (7.13)$$

де κ – коефіцієнт теплопровідності; $\frac{dT}{dx}$ – градієнт температури, тобто зміна температури на одиницю відстані між шарами; Δt – час.

Для газів коефіцієнт теплопровідності може бути виведений з молекулярно-кінетичної теорії:

$$\kappa = \frac{1}{3} \lambda c_v \rho \quad (7.14)$$

де c_v – питома теплоємність при сталому об'ємі; ρ – густина газу.

З формули видно, що визначальним у теплопровідності газів є середня швидкість, тому важкі гази мають меншу теплопровідність, ніж легкі (за нормальних умов теплопровідність кисню становить $0,0239 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ водню $0,176 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$).

7.4.2. В'язке тертя. Закон Ньютона

При русі рідини або тіл у рідині або газі внаслідок обміну молекул імпульсами між шарами рідини виникає в'язке тертя. В'язке тертя описується законом Ньютона: *сила в'язкого тертя при відносно-*

му русі двох шарів рідини або газу пропорційна градієнту швидкості і площі дотику цих шарів (рис.7.6):

$$F = -\eta \frac{dv_x}{dz} S \quad (7.15)$$

де η – коефіцієнт в'язкого тертя (динамічної вязкості); $\frac{dv_x}{dz}$ – градієнт швидкості; S – площа дотику шарів рідини або газу.

Молекулярно-кінетична теорія дає такий вираз для коефіцієнта в'язкого тертя газів:

$$\eta = \frac{1}{3} \langle v \rangle \rho \lambda \quad (7.16)$$

де $\langle v \rangle$ – середня швидкість; ρ – густина.

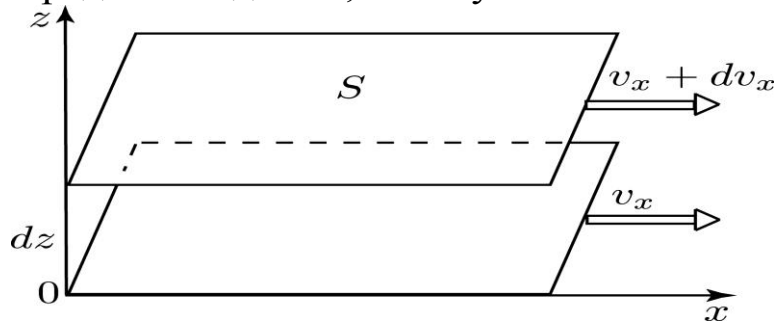


Рис.7.6

7.4.3. Дифузія. Закон Фіка. Осмос

Дифузія – явище спонтанного переміщення молекул речовини з місць із більшою концентрацією в місця з меншою внаслідок теплового руху. Розглянемо процес самодифузії в циліндричній посудині, де концентрація газу зменшується в напрямі осі x (рис. 7.7). Унаслідок хаотичності руху у середньому в кожному напрямі рухається одна шоста всіх молекул. Через переріз посудини площею S за час Δt пройдуть молекули, які знаходяться на відстані від $-\lambda$ до $+\lambda$ масою

$$\Delta m = \frac{1}{6} S \lambda \Delta \rho \quad (7.17)$$

де $\langle \lambda \rangle$ – середня довжина вільного пробігу молекул, $\Delta \rho$ – зміна густини на відстані від $-\lambda$ до $+\lambda$.

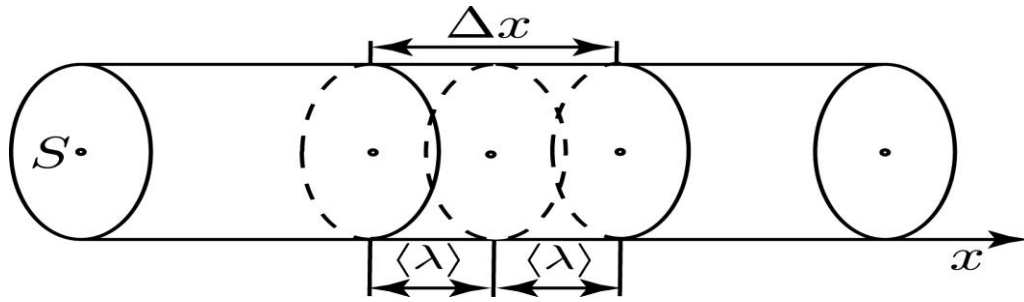


Рис. 7.7

Введемо градієнт густини – зміну концентрації газу на одиницю

довжини вздовж осі x $\frac{d\rho}{dx}$, тоді зміна густини на відстані Δx :

$$\Delta \rho = \frac{d\rho}{dx} \cdot \Delta x \quad \text{де} \quad \frac{\Delta x}{\lambda} = \frac{2\lambda}{\lambda} = 2 \quad (7.18)$$

Підставивши вираз (7.18) у формулу (7.17), отримаємо:

$$\Delta m = \frac{1}{3} \lambda \frac{d\rho}{dx} S \Delta x \quad (7.19)$$

Введемо коефіцієнт дифузії D . Для газів він залежить від швидкості молекул і середньої довжини вільного пробігу:

$$D = \frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle \quad (7.20)$$

Перенос маси при дифузії описується законом Фіка: *маса перенесеної речовини прямо пропорційна градієнту густини, площі, через яку відбувається перенесення, і часу:*

$$\Delta m = D \frac{d\rho}{dx} S \Delta x \quad (7.21)$$

Співвідношення між коефіцієнтами перенесення газів наведені у табл. 7.1.

Таблиця 7.1

Рівняння явищ переносу та коефіцієнти перенесення

| Явище | Величина що переноситься | Рівняння процесу | Коефіцієнт перенесення |
|------------------|--------------------------|--|---|
| Дифузія | Маса | $\Delta m = D \frac{d\rho}{dx} S \Delta x$ | $D = \frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle$ |
| Внутрішнє тертя | Імпульс | $F = \eta \frac{dv_x}{dx} S$ | $\eta = \frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle \rho$ |
| Теплопровідність | Енергія | $\Delta Q = \kappa \frac{dT}{dx} S \Delta x$ | $\kappa = \frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle \rho c_v$ |

Процеси дифузії відіграють важливу роль у біологічних клітинних структурах. Дифузія життєво важливих речовин (іонів натрію, калію, магнію, кальцію та ін.) через клітинні біологічні мембрани має специфічні особливості, зумовлені напівпроникністю мембран.

Біологічні мембрани, товщина яких становить менше 0,01 мкм, пропускають молекули води, які мають малий діаметр, і не пропускають молекули розчиненої речовини (солі, білки, сахарозу).

Явище односторонньої дифузії (осмосу) можна спостерігати, якщо скляну трубку, закриту знизу мембраною і заповнену розчином цукру, помістити у посудину з водою. Вода з посудини проникає через мембрану в трубку, виникає додатковий осмотичний тиск і розчин буде підніматися по ній до деякої висоти (рис.7.8).

Голландський фізик-хімік Вант-Гофф (1852 – 1911) установив, що *осмотичний тиск чисельно дорівнює тиску, який чинила б розчинена речовина, якби вона знаходилась у стані ідеального газу і займала об'єм, який дорівнює об'єму всього розчину:*

$$P = \frac{nRT}{V} = cRT \quad (7.22)$$

де c – концентрація розчиненої речовини.

Осмотичний тиск у клітинах рослин, тварин і мікроорганізмів залежить від концентрації речовин, розчинених в їх рідких середовищах і може досягати 5 МПа.

У 2009 р. Державна енергетична компанія Statkraft (Норвегія) побудувала першу в світі екологічно чисту осмотичну електростанцію потужністю 5 кВт, в якій різниця рівнів досягається за рахунок дифузії прісної води у відсік з морською.

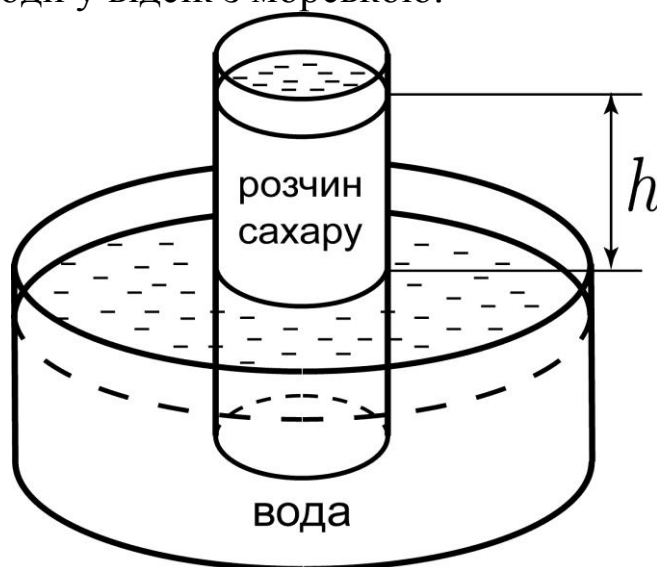


Рис.7.8

Контрольні запитання

1. Як знайти число молекул, швидкості яких лежать у межах від u до $u + du$;
2. Запишіть барометричну формулу і формулу Больцмана.
3. Запишіть формулу найбільш імовірної, середньої і середньоквадратичної швидкостей молекул ідеального газу.
4. Від яких параметрів залежить довжина вільного пробігу молекул?
5. Які існують шляхи передачі тепла?
6. Що таке теплопередача? Запишіть формулу закону Фур'є.
7. Сформулюйте закон Ньютона. Запишіть формулу закону.
8. Який фізичний зміст коефіцієнта внутрішнього тертя?
9. Що таке дифузія? Запишіть закон Фіка.
10. Який фізичний зміст коефіцієнта дифузії? Запишіть формулу коефіцієнта дифузії газу.
11. Дайте визначення поняття «осмос»?
12. Запишіть формулу закону Вант-Гоффа.

8. РЕАЛЬНІ ГАЗИ. ВЛАСТИВОСТІ РІДИНИ

8.1. Реальні гази. Рівняння Ван-дер-Ваальса

У 1869 р. англійський хімік Т. Ендрюс поставив експерименти з ізотермічного стиснення вуглекислого газу. Він виявив, що спочатку стиснення описується законом Бойля-Маріотта, а при деякому об'ємі газ починає конденсуватися при постійному тиску (тиск насиченої пари постійний) і, при деякому об'ємі, газ перетворюється у рідину яка фактично не стискується. Для опису реального газу голландський вчений Ван-дер-Ваальс (1837 – 1923) увів поправки на власний об'єм молекул b і сили взаємодії молекул. Рівняння стану для реального газу, яке отримав Ван-дер-Ваальс для одного моля, має вигляд:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = R T \quad (8.1)$$

де $\frac{a}{V^2}$ додатковий внутрішній тиск молекул реального газу, який виникає внаслідок взаємодії молекул.

Поправки a і b для кожного газу визначаються дослідним шляхом. Для довільної кількості газу:

$$\left(p + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = RT \quad (8.2)$$

Теоретичні ізотерми Ван-дер-Ваальса для різних температур наведені на рис. 8.1.

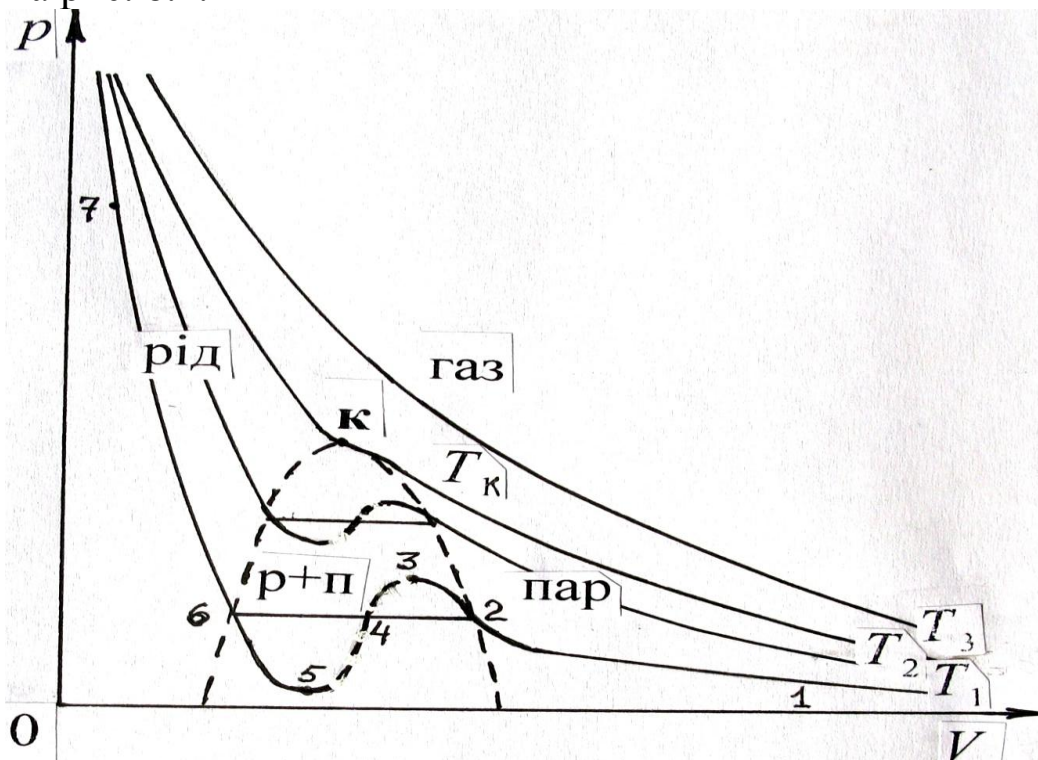


Рис.8.1

При високих температурах ізотерми подібні до ізотерм ідеального газу, при низьких температурах об'єм може приймати три різних значення. Між ними є критична ізотерма T_c , яка містить точку перетину K . Розглянемо ізотерму, яка має температуру менше критичної. Ділянка 1-2 – стиснення ненасиченої пари. У точці 2 пара стає насиченою. На ділянці 2-3-4 -5-6 співіснують насичений пар і рідина. Ділянка 6-7 описує процес стиснення рідини. Експериментальна ізотерма відхиляється від кривої 2-3-4 -5-6, і спрямовується по ізобарі 2-6. Якщо дослід проводити з чистою речовиною, то можна досягти станів 2-3 (перенасичений пар) і 6-5 (перегріта рідина). Ділянка 3-4-5 не виявляється дослідним шляхом. Якщо з'єднати крайні точки горизонтальних ділянок ізотерм Ван-дер-Ваальса, то виявляються області рідкої фази p , рідини і пари $p+n$, пари $пар$, газу $газ$ (стан газу, що нижче від критичної температури називається парою, а вище – газом).

8.2. Властивості рідини

8.2.1. Структура і властивості води

Рівняння Ван-дер-Ваальса якісно описують перехід від рідкого до газоподібного стану. Молекули рідини розташовуються не зовсім хаотично, кожна з них оточують 5 – 6 сусідок, центри яких лежать у вершинах багатокутників. Таке розташування називається *близьким порядком* на відміну від кристалів, де реалізується *далекий порядок*. Між молекулами рідини діють слабкі ван-дер-ваальсівські сили, які обернено пропорційні шостому степеню відстані між молекулами. При зростанні температури в'язкість рідини зменшується, а коефіцієнт дифузії зростає. Рідина поглинає (абсорбує) гази, кількість яких збільшується з тиском.

Найбільш загадковою рідиною в природі є вода. Фізичні властивості води своєрідні і часто аномальні порівняно з іншими рідинами. Так, вона має аномально високу теплоємність, теплоту плавлення і теплоту пароутворення. Важливим для біосфери є значне збільшення її густини при замерзанні. Аномальні властивості води зумовлені водневими зв'язками і структурою її молекул. У молекулі води два протона утримуються оксисеном завдяки дуже сильним водневим зв'язкам. Тривимірна структура води виникає тому, що одночасно виконуються такі умови: чотири водневих зв'язки на одну молекулу і оптимальні розміри молекул, які відповідають оптимальним напрямкам водневих зв'язків (рис. 8.2). Така структура пронизує увесь об'єм льоду, а в рідині зберігається частково.

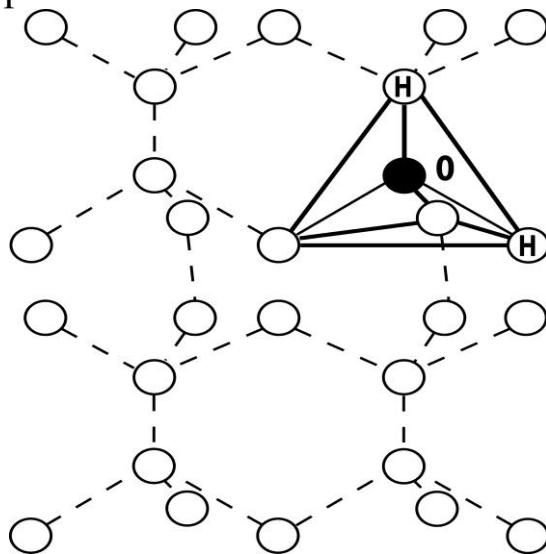


Рис.8.2

У живих організмах вода знаходиться у тонких прошарках, товщина яких близька до розмірів водневих зв'язків, і її молекули втрачають рухливість. Вода, яка міститься у тонкому шарі, що розділяє мембрани клітини, в 70 разів краще проводить тепло і в 10 разів зменшує зовнішнє електричне поле. Це пов'язано з дією біологічних поверхонь на воду і, навпаки, вода забезпечує стабільність клітинних мембран. Вода – це не просто середовище біологічного об'єкта, а ніби елемент живого. За оцінками експертів ВООЗ, близько 75 % усіх захворювань пов'язані із споживанням неякісної води; 94 % усіх світових запасів води становить солоний Світовий океан і тільки 6 % – прісна вода, з якої 4,12 % – під землею. Тому, поки не пізно потрібно покращувати екологію відкритих джерел води і не забруднювати підземні.

8.2.2. Поверхневий натяг. Капілярні явища

Поверхневий шар рідини за своїми властивостями відрізняється від внутрішніх частин рідини тому, що результуюча сил міжмолекулярної взаємодії на поверхні не дорівнює нулю (рис.8.3). Як наслідок, результуюча сил міжмолекулярної взаємодії поверхневого шару чинять на рідину тиск, який називається молекулярним. Цей тиск приводить до появи поверхневої (потенціальної) енергії, яка пропорційна площі поверхні ΔS :

$$\Delta W = \sigma \Delta S, \quad (8.2)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу.

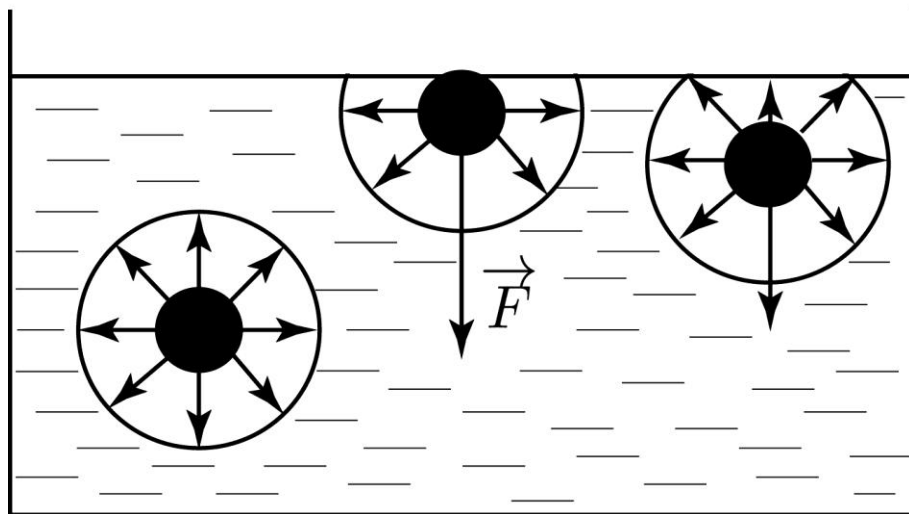


Рис.8.3

Поверхнева енергія дорівнює роботі, яку необхідно виконати для збільшення поверхні на величину ΔS , тобто $\Delta W = A$. Розмірність коефіцієнта поверхневого натягу:

$$[\sigma] = \frac{Дж}{м} = \frac{Н}{м} \quad (8.3)$$

Коефіцієнт поверхневого натягу можна визначати як силу яка діє на одиницю довжини плівки:

$$[\sigma] = \frac{F}{\ell} \quad (8.4)$$

Крапля рідини на поверхні твердого тіла розтікається по його поверхні, якщо сили притягання між молекулами тіла і рідини більше від сил притягання між молекулами рідини – має місце **явище змочування** (рис.8.4, а, в). Кут θ називається крайовим кутом. Якщо сили притягання між молекулами тіла і рідини менше сил притягання між молекулами рідини, має місце **явище незмочування** (рис.8.4, б, г).

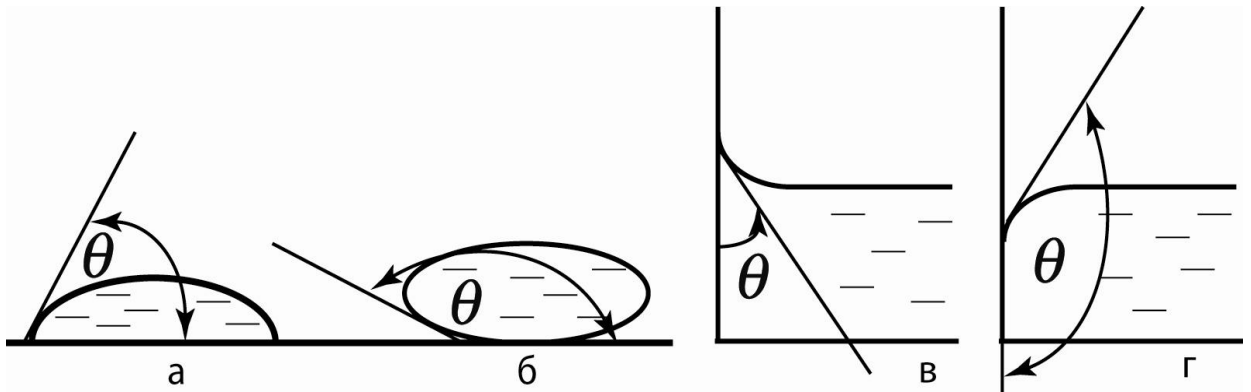


Рис.8.4

Явища змочування і незмочування призводять до викривлення поверхні рідини біля стінки посудини (рис. 6.15). Під викривленою поверхнею рідини (меніском) створюється додатковий тиск, зумовлений силами поверхневого натягу, які намагаються зменшити її поверхню.

Опуклий меніск чинить на рідину додатковий тиск Δp , який направлено униз (рис.6.15,а), угнутий меніск зменшує тиск на рідину (рис.6.15,б). Визначимо додатковий тиск через роботу сил поверхневого натягу на зменшення поверхні сферичної краплі радіуса r на величину dS і об'єм на dV :

$$dA = \sigma dS \quad (8.5)$$

$$\text{де } S=4\pi R^2; dS=8\pi r dr; V=4\pi r^3/3; dV=4\pi r^2 dr$$

Підставивши dS і dr у формулу (6.41), отримаємо:

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r}. \quad (8.6)$$

Додатковий тиск під викривленою поверхнею рідини в загальному випадку з меніском з подвійною кривизною (головні радіуси подвійної кривизни R_1 і R_2) описується формулою Лапласа:

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (8.7)$$

З формул (8.6) і (8.7) видно, що додатковий тиск обернено пропорційний радіусу кривизни, тому він дуже помітний у трубках малого діаметра (капілярах). Поверхневий натяг може спричинити закупорку судин, через які протікає рідина, якщо в кровоносну судину людини або рослини потрапить газова бульбашка (наприклад, кесонна хвороба у водолазів).

Коли рідина тече, її напір зліва (рис.8.5,в) вирівнює поверхню, а справа поверхня викривиться ще більше. Додатковий тиск $\Delta p = \Delta p_2 - \Delta p_1$ спрямований проти течії рідини в трубках малого діаметра може припинити течію рідини. Так, при швидкому підйомі водолаза виникає кесонна хвороба. Унаслідок механічних пошкоджень, повітря може потрапляти в судини дерев і рослин, закупорювати капіляри, що зумовить відмирання клітин.

Зміна висоти рівня рідини в трубках малого діаметра отримала назву капілярності. Висоту зміни рівня рідини в капілярі можна визначити з умови рівноваги додаткового і гідростатичного тисків (рис.8.5, а,б):

$$\frac{2\sigma}{R} = \rho g h \quad (8.8)$$

Висота зміни рівня рідини в капілярі:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r} \quad (8.9)$$

де радіус кривизни меніска $R = r / \cos \theta$; r – радіус капіляра.

Таким чином, висота підняття (опускання) рідини в капілярі збільшується зі збільшенням коефіцієнта поверхневого натягу і зменшенням радіуса капіляра. Капілярні явища відіграють важливу роль у

природі, техніці, сільському господарстві, лісівництві. Переріз стовбура деревини має річні шари, які складаються з величезної кількості капілярів, діаметр яких становить 0,016 – 0,4 мм. Розрахунки показують, що висота підйому води в деревині не перевищує 1,5 м. Капілярність і атмосферний тиск вносять певну частку транспортування води і перенос поживних речовин у рослинах, але основним є наявність сил когезії між молекулами води та наявність від'ємного тиску.

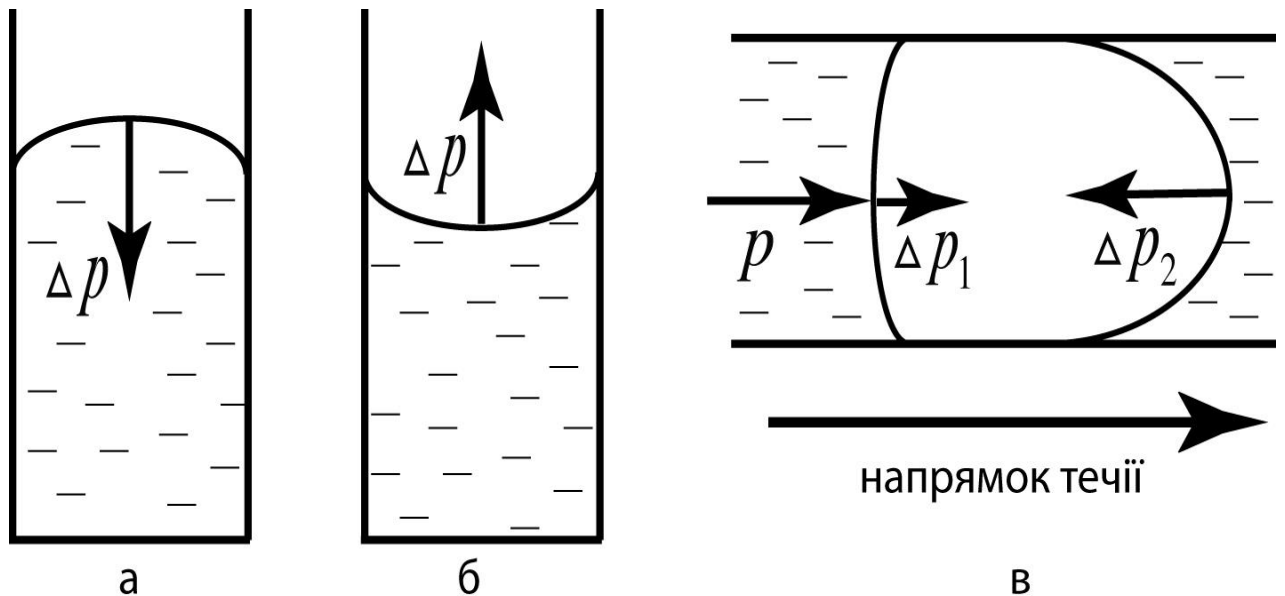


Рис. 8.5

Коефіцієнт поверхневого натягу залежить від хімічного складу рідини, природи сил зв'язку, температури та домішок. Цукор, сіль збільшують поверхневий натяг, а мило, жирні кислоти – зменшують.

Речовини, які послаблюють поверхневий натяг рідини, називаються поверхнево-активними (ПАР). Вони застосовуються в миючих засобах, емульгаторах, піноутворювачах, відіграють суттєву роль у біологічних процесах на клітинному рівні. Личинки комарів, водяні жуки підвішуються знизу до водяної плівки. Для боротьби з малярійними комарами на поверхню водойми наноситься тонкий шар поверхнево-активної речовини. Личинки комарів не втримуються поверхневою плівкою, занурюються у воду і, позбавлені повітря, гинуть.

У поверхневому шарі альвеол легень є моношар сурфактанту – ПАР, який збільшує тиск в альвеолах і перешкоджає їх складанню при глибокому видиху. Якщо сурфактанту недостатньо, тоді розвивається легенева недостатність.

Важливу роль відіграють ПАР у процесах травлення, коли клітини організму захоплюють речовини і переварюють їх. Захоплення

здійснюється за допомогою вип'ячувань, що виникають на поверхні клітин внаслідок зменшення поверхневого натягу. Здатність жовчі сприяти травленню жирів залежить не тільки від її хімічної дії. Жовч відносно до жирів є ПАР і тому зменшує поверхневий натяг крапель жиру, що сприяє їх подрібненню на менші краплини. Вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу клітин виявило наявність білків у цитоплазматичній мембрані, що пізніше підтвердилося електронно-мікроскопічними дослідженнями.

8.2.3. Рідкі кристали

Рідини, у яких існує дальній порядок у розміщенні і взаємній орієнтації молекул, називаються рідкокристалічними. Вони мають властивості як рідини (плинність), так і твердого тіла (анізотропія електропровідності, теплопровідності, діелектричної проникності, магнітної сприйнятливості, оптичних властивостей).

Такий стан характерний для речовин, які мають довгі молекули. Існують *ліотропні* і *термотропні* рідкі кристали. Перші поширені в живих організмах (мембрани клітин, віруси), це розчини мила у воді та ін. Термотропні рідкі кристали існують у певному інтервалі температур.

За ступенем упорядкованості молекул розрізняють *нематичні, смектичні і холестеричні рідкі кристали*. У нематичних кристалах ниткоподібні молекули розміщуються паралельно (рис. 8.5,а), у смектичних шарами паралельно один до одного (рис. 8.5,б). У холестеричних кристалах (різновид нематичних) молекули в одній площині розміщуються паралельно одна до одної, але молекули кожної наступної площини повернуті на деякий кут відносно попередньої, утворюючи спіралеподібну форму (рис.8.5,в).

Рідкі кристали мають упорядковану структуру, яка дає змогу молекулам переміщуватися поступально і не дозволяє обертатися. Молекули рідких кристалів змінюють орієнтацію під впливом малих електричних і магнітних полів, що використовується для візуалізації інформації в рідкокристалічних моніторах комп'ютерів, телевізорів, годинниках та ін.

Холестеричні рідкі кристали змінюють забарвлення при зміні температури, що застосовується для вимірювання температури.

Система «мило – вода» – типовий приклад ліотропного смектичного рідкого кристала. Молекула мила має головку, яка розчиняєть-

ся у воді, і вуглеводний ланцюжок, що не розчиняється у воді. Від'ємним електричним зарядом мильні диполі орієнтуються перпендикулярно до молекул води. Виникає структура подвійних шарів, в якій подвійний молекулярний шар мила межує з шаром води (рис.8.6,а).

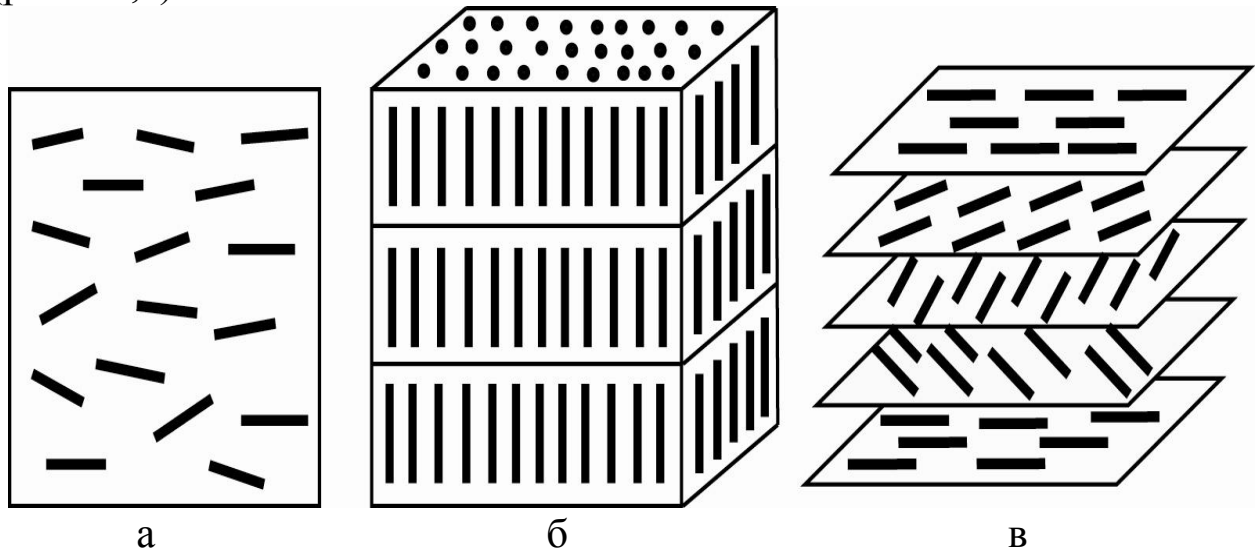
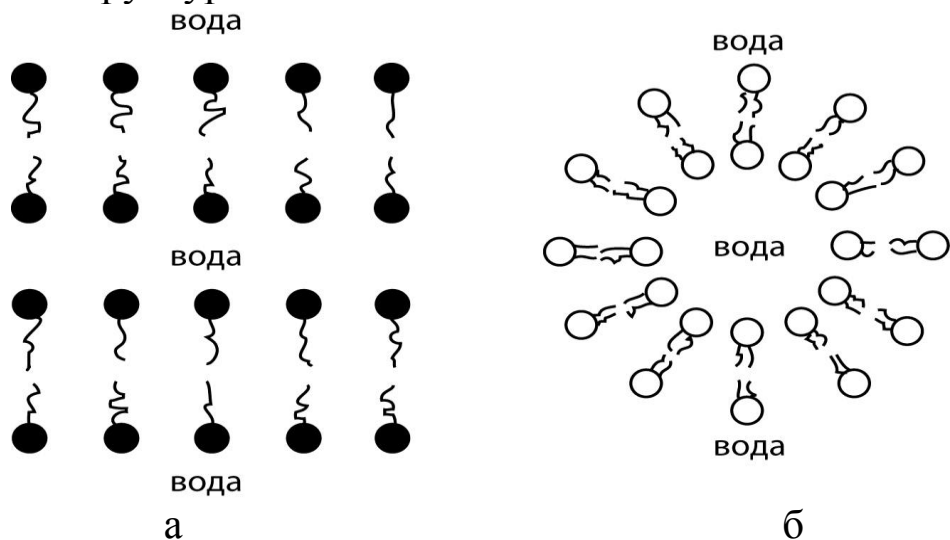


Рис.8.5

Шарувата структура забезпечує рухливість шарів. Мило, як поверхнево-активна речовина, зменшує поверхневий натяг води, проникає в пори, зменшує сили зв'язку забруднюючих частинок з поверхнею, завдяки чому вони легко переходять у миючий розчин. Бішарувата ліпідна фаза біологічних мембран подібна системі мило-вода. Щоб позбутися країв, біліпідний шар намагається замкнутися на себе, набуваючи кільцеподібної форми (рис 8.6,б). Важливу роль рідкокристалічний стан біологічних мембран відіграє у процесах йонного транспорту, механізмах фотосинтезу і зору, в процесах самоорганізації біологічних структур.



Контрольні запитання

1. Чим реальний газ відрізняється від ідеального?
2. Запишіть рівняння Ван-дер-Ваальса.
3. Чому внутрішня енергія реального газу залежить від об'єму?
4. Який фізичний зміст коефіцієнтів a і b у рівнянні Ван-дер-Ваальса.
5. Чим відрізняється газ від пари?
6. Чим обумовлені аномальні властивості води?
7. Які особливості поверхневого шару рідини?
8. Дайте визначення коефіцієнта поверхневого натягу.
9. Як проявляється явище змочування?
10. Чим пояснюють наявність крайових кутів?
11. За якою формулою визначається додатковий тиск на рідину?
12. Що називається капілярами?
13. Які явища називаються капілярними?
14. Що називається рідкими кристалами?
15. Які існують види рідких кристалів?
16. Якими властивостями характеризуються рідкі кристали?
17. Як розрізняють рідкі кристали за ступенем упорядкованості?
18. Яка роль рідкокристалічних кристалів у біологічних структурах?

9. ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ**9.1. Внутрішня енергія**

Термодинаміка – це розділ фізики, у якому вивчають теплові явища в газах, рідинах і твердих тілах на основі процесів перетворення енергії. Молекули і атоми речовини безупинно рухаються і взаємодіють між собою, тому речовина має внутрішню енергію.

Внутрішня енергія термодинамічної системи U – це сума кінетичних E_i^k і потенціальних E_i^n енергій усіх частинок (молекул або атомів), які утворюють систему:

$$U = \sum_{i=1}^n E_i^k + \sum_{i=1}^n E_i^n \quad (9.1)$$

Кінетичну енергію частинки і тіла набувають унаслідок руху, а потенціальну – внаслідок взаємодії між собою. Кінетична енергія мо-

лекул залежить від числа незалежних координат (ступенів вільності), які має тіло в процесі руху. Рух твердого тіла в просторі визначається трьома поступальними ступенями вільності і трьома обертальними. Одноатомна молекула має три поступальних ступені вільності, двоатомна – три поступальних і два обертальних, трьохатомна – три поступальних і три обертальних. Якщо атоми в молекулі коливаються (при високих температурах), то виникають і коливальні ступені вільності. Взагалі число ступенів вільності становить:

$$i = i_{\text{пер}} + i_{\text{об}} + i_{\text{кол}} \quad (9.2)$$

На коливальний ступінь вільності припадає кінетична і потенціальна енергія, тому з'являється коефіцієнт 2. Больцман встановив закон рівномірного розподілу енергії за ступенями вільності: в середньому на кожний ступінь вільності припадає однакова енергія

$$E^* = \frac{i}{2} kT, \quad \text{де } k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \text{ стала Больцмана.}$$

Внутрішня енергія ідеального газу дорівнює добутку числа молекул N на середню кінетичну енергію однієї молекули:

$$U = N \cdot \frac{i}{2} kT \quad (9.3)$$

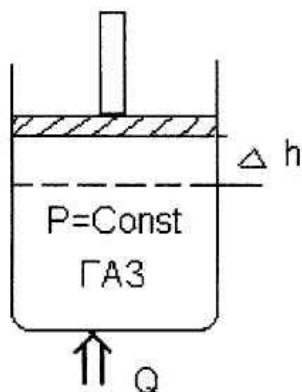
Підставимо число молей ν . Тоді внутрішня енергія ідеального газу:

$$U = \frac{i}{2} \nu R T \quad (9.4)$$

де $R = k \cdot N_A$ – універсальна газова стала.

З формули (9.4) видно, що для заданої маси m внутрішня енергія ідеального газу і її зміна ΔU залежать тільки від температури і тому є функцією стану термодинамічної системи.

9.2. Робота ідеального газу



Розглянемо процес квазістатичного розширення газу в циліндрі об'ємом V під поршнем площею S при постійному тиску (рис. 9.1). Газ, розширюючись, тисне на поршень, і виконує роботу:

$$A = p \Delta V = p S \Delta h \quad (9.5)$$

Робота газу при постійному тиску дорівнює добутку тиску на зміну об'єму (рис.9.2).

Рис. 9.1.

Якщо тиск газу змінюється, то робота дорівнює інтегральній сумі робіт при дуже малих змінах об'єму dV :

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (9.6)$$

Якщо термодинамічна система тіл виконує роботу, то внутрішня енергія зменшується ($A = -\Delta U$). Робота над системою приводить до збільшення внутрішньої енергії системи: ($\Delta U = -A$)

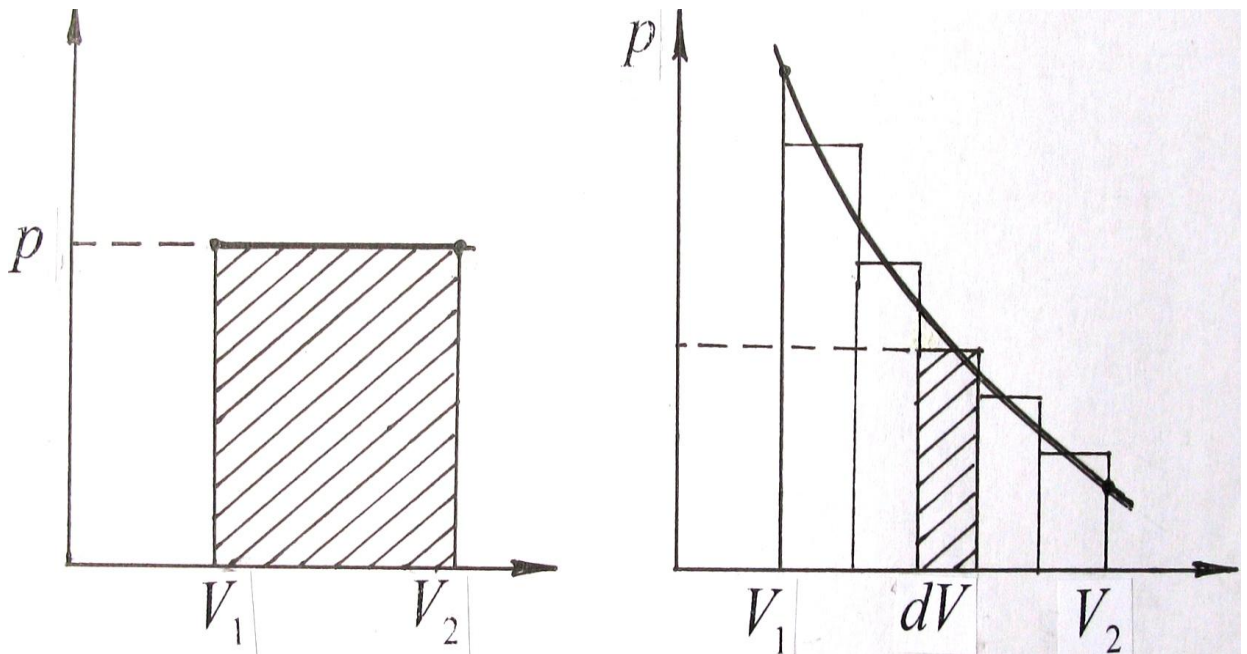


Рис.9.2

Розглянемо роботу газу при ізопроцесах:

1. **Ізотермічний процес** ($T = const$).

$$p = \frac{\nu RT}{V} \quad (9.7)$$

де тиск газу $p = \frac{\nu RT}{V}$ – рівняння Менделєєва-Клапейрона.

2. **Ізобарний процес** ($p = const$).

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (9.8)$$

3. *Ізохорний процес* ($V = \text{const}$, $dV = 0$):

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = 0 \quad (9.9)$$

Розглянемо круговий термодинамічний квазістатичний процес (цикл). Циклічним називається процес, у результаті якого система переходить через проміжні стани і повертається в початковий стан.

Нехай термодинамічна система переходить з точки 1 з параметрами p_1, V_1, T_1 у точку 2 з параметрами p_2, V_2, T_2 по шляху 1-а-2, а з точки 2 в точку 1 по шляху 2-б-1 (рис.9.3). У такому процесі робота дорівнює різниці робіт, тому робота по замкненому шляху не дорівнює нулю:

$$A = \int_{\text{цикл}} p dV \neq 0 \quad (9.10)$$

Таким чином, робота газу залежить від форми шляху переходу, не характеризує однозначно стан системи, тому не є функцією стану будь-якої термодинамічної системи.

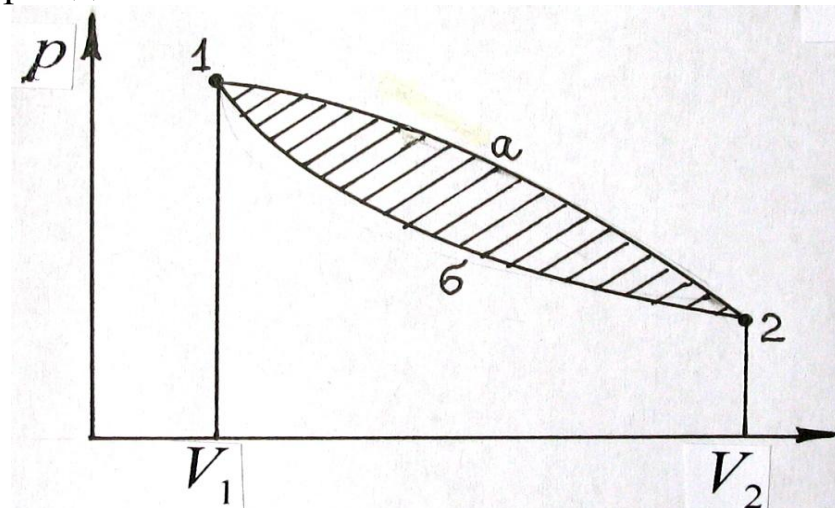


Рис 9.3

Теплопередачею (теплообміном) називається процес зміни внутрішньої енергії ΔU термодинамічної системи без виконання роботи. Мірою зміни внутрішньої енергії ΔU при теплопередачі є кількість теплоти Q . Важливою фізичною характеристикою речовини є теплоємність. Загальна теплоємність будь-якого тіла – кількість теплоти, яка потрібна для нагрівання тіла на один градус.

Питоною теплоємністю називається величина, що чисельно дорівнює кількості теплоти dQ , яку необхідно передати одиниці маси ($m=1\text{кг}$) речовини для нагрівання її на один Кельвін ($dT=1\text{K}$):

$$c = \frac{dQ}{m dT}; \quad [c] = \frac{\text{Дж}}{\text{кгК}} \quad (9.11)$$

За формулою (9.11) можна обчислити кількість теплоти Q , яка потрібна для нагрівання будь-якого тіла.

Молярною теплоємністю називається величина, чисельно рівна кількості теплоти dQ , яку необхідно передати одному молю речовини для нагрівання її на один Кельвін:

$$\tilde{c} = \frac{dQ}{\nu dT} \quad (9.12)$$

Газ можна нагріти при постійному тиску або при постійному об'ємі, тому розрізняють теплоємність при постійному об'ємі C_v і при постійному тиску C_p . Знайдемо молярну теплоємність при постійному об'ємі:

$$\tilde{c}_v = \frac{dQ}{\nu dT} \quad (9.13)$$

Замінімо dQ на dU тому, що робота при постійному об'ємі не виконується. Молярна теплоємність при постійному тиску:

$$\tilde{c}_p = \frac{dQ}{\nu dT} = \frac{dU + p dV}{\nu dT} \quad (9.14)$$

де R – робота одного моля газу при збільшенні температури на 1K при постійному тиску – універсальна газова стала. Рівняння (9.15) було отримано Р. Майєром (1814 – 1878). Підставимо у формули теплоємності значення внутрішньої енергії:

$$\tilde{c}_v = \frac{dU}{\nu dT} = \frac{C_v \nu dT}{\nu dT} = C_v \quad (9.15)$$



$$(9.16)$$

Внутрішня енергія і швидкість її зміни $\frac{dU}{dT}$ не залежать від p і V .

9.3. Перший закон термодинаміки

Перший закон термодинаміки – це закон збереження енергії в термодинамічних процесах. Якщо підводити до циліндра ззовні теплоту (рис.9.1), то вона, згідно з законом збереження енергії, витрачається на роботу переміщення поршня і на зростання внутрішньої енергії системи внаслідок теплопередачі.

Кількість теплоти Q , що передана системі (тілу), дорівнює сумі зміни її внутрішньої енергії ΔU і роботі A системи проти зовнішніх сил:

$$Q = \Delta U + A. \quad (9.17)$$

З першого закону термодинаміки випливає, що *внутрішню енергію термодинамічної системи можна змінити або шляхом виконання роботи, або шляхом теплопередачі (теплообміну).*

Застосуємо перший закон термодинаміки до ізопроцесів у газах.

1. При ізотермічному розширенні ($m = \text{const}$, $T = \text{const}$) зміна внутрішньої енергії газу дорівнює нулю ($\Delta U = 0$), тому що $\Delta T = 0$.

Передана газу кількість теплоти Q при ізотермічному процесі іде на виконання роботи розширення газу: $Q = A$.

2. При ізобарному розширенні ($m = \text{const}$, $p = \text{const}$) газ нагрівається і виконує роботу $Q = \Delta U + A$

3. При ізохорному нагріванні ($m = \text{const}$, $V = \text{const}$) робота газу дорівнює нулю ($A = 0$). Передана системі (газу) кількість теплоти Q іде на збільшення внутрішньої енергії $Q = \Delta U$.

9.4. Фазові перетворення. Діаграма стану системи

Фазою називається термодинамічний рівноважний стан речовини, що за своїми фізичними властивостями відрізняється від

інших можливих рівноважних станів тієї ж речовини. Наприклад, якщо в закритій посудині перебуває вода – система є двофазною: *рідка фаза* – вода і *газоподібна фаза* – насичена пара. Якщо у воду кинути шматочки льоду, то система стане трифазною.

Фазовий перехід – це перехід речовини з однієї фази в іншу. Фазові переходи першого роду завжди супроводжуються стрибкоподібними змінами об'єму, внутрішньої енергії, ентропії, *поглинанням* або *виділенням* теплоти. Приклад фазового переходу першого роду – *зміна агрегатного стану* речовини (плавлення, кристалізація, кипіння).

Фазові переходи другого роду не пов'язані з поглинанням чи виділенням теплоти та зміною об'єму. Вони супроводжуються зміною теплоємності (перехід феромагнетика в парамагнітний стан, перехід металів у надпровідний стан, перехід гелію у надплинний стан).

Двофазна система перебуває у рівновазі тільки у визначеному інтервалі температур. Рівновагу фаз можна зобразити у вигляді діаграми стану в координатах p - T , де кожному значенню температури відповідає відповідне значення тиску (рис 9.4). Крива випаровування відповідає точкам, у яких газ і рідина перебувають у рівновазі, крива плавлення – рівновазі твердого і рідкого станів, крива сублімації – рівновазі твердої і газоподібної фази. Всі криві перетинаються в точці, яка називається *потрійною*. Температура і тиск потрійної точки води становлять $T_{nm} = 273,16K$, $p_{nm} = 610$ Па.

Зміна температури фазового переходу залежно від зміни тиску описується рівнянням Клапейрона-Клаузіуса:

$$\frac{dT}{dp} = \frac{T(V_2 - V_1)}{\lambda}, \quad (9.18)$$

де $(V_2 - V_1)$ – зміна об'єму внаслідок переходу з однієї фази в іншу; T – абсолютна температура; p – тиск.

Доведено, що при зниженні температури у фосфоліпідній мембрані відбувається фазовий перехід першого роду з рідкокристалічного у гелі-стан, який відіграє важливу роль у холодостійкості рослин.

Розглянемо деякі фазові перетворення. Більшість твердих тіл є **кристалічними**. У кристалах атоми утворюють у просторі кристалічну решітку.

Плавленням твердих тіл називається перехід речовини з твердого (кристалічного) стану в рідке. Плавлення простих речовин відбувається при постійній температурі $T_{пл}$, яка називається *тем-*

пературою плавлення. При температурі плавлення тіло перебуває одночасно у твердому і рідкому станах.



Рис.9.4

Вся кількість теплоти Q , що підводиться до твердого тіла при плавленні, іде на руйнування кристалічної решітки, тому тіла плавляться при постійній температурі (сплави плавляться в деякому інтервалі температур).

Питомою теплотою плавлення λ називається величина, яка чисельно дорівнює кількості теплоти Q , що необхідна для переходу одиниці маси m кристалічної речовини в рідкий стан при температурі плавлення ($T_{пл}$):

$$\lambda = \frac{Q}{m}. \tag{9.19}$$

Одиниця виміру питомої теплоти плавлення *Дж/кг*.

Перехід речовини з рідкого у твердий стан називається кристалізацією. Цей процес проходить при постійній температурі кри-

талізації $T_{\text{крист}}$, яка дорівнює температурі плавлення $T_{\text{пл}}$. **Питома теплота кристалізації λ** дорівнює питомій теплоті плавлення.

Процес переходу речовини з рідкого стану в газоподібний називається пароутворенням. **Пароутворення, що відбувається при будь-якій температурі з вільної поверхні рідини, називається випаровуванням.** Молекули, які вилітають при випаровуванні, називаються паром цієї рідини. Випаровування з твердого стану називається **сублімацією**.

При випаровуванні з рідини вилітають молекули, які мають найбільшу кінетичну енергію, тому рідина охолоджується. Якщо випаровування відбувається в закритій посудині, то через якийсь час **наступає динамічна (рухлива) рівновага** між процесами випаровування і конденсації. Конденсація – процес перетворення пари в рідину. При рівновазі кількість молекул, які переходять у пару, дорівнює кількості молекул які переходять з пари у рідину. **Пара, що перебуває в динамічній рівновазі зі своєю рідиною, називається насиченою.**

Кипінням називається процес інтенсивного пароутворення не тільки з вільної поверхні, але й з усього об'єму рідини. Рідина випаровується в бульбашки пари, які утворюються при кипінні. Температурою (точкою) кипіння називається температура рідини, при якій тиск її насиченої пари (p_H) не набагато перевищує зовнішній тиск P :

$$p_H \geq P + \frac{2\sigma}{R}. \quad (9.20)$$

У процесі кипіння температура рідини залишається постійною. **Питомою теплотою паротворення r** називається величина, чисельно рівна кількості теплоти Q , яка необхідна для перетворення в пару одиниці маси m рідини при температурі кипіння:

$$r = \frac{Q}{m}. \quad (9.21)$$

Одиниця вимірювання питомої теплоти паротворення – Дж/кг. При зворотному процесі (конденсації) **виділяється та сама кількість теплоти Q** , що і при пароутворенні.

При згорянні палива виділяється теплова енергія. Паливо характеризують **питомою теплотою згорання**:

$$\lambda = \frac{Q}{m}. \quad (9.22)$$

Питома теплота згоряння палива чисельно дорівнює кількості теплоти Q , що виділяється при повному згорянні одиниці маси палива. Одиниця виміру λ – Дж/кг.

9.5. Адіабатичний процес. Рівняння Пуассона

Адіабатичним називається термодинамічний процес, який відбувається в системі без теплообміну із зовнішнім середовищем: $Q=0$, $\Delta Q=0$. Застосовуючи перший закон термодинаміки, отримаємо:

$$A = -\Delta U \quad \text{або} \quad \Delta U = -A \quad (9.23)$$

З формули (9.23) випливає, що адіабатичне розширення газу відбувається за рахунок зменшення внутрішньої енергії газу, а робота зовнішніх сил ($-A$) над системою приводить до збільшення внутрішньої енергії системи. Рівняння адіабатичного процесу (рівняння Пуассона) у координатах p - V має вигляд:

$$pV^\gamma = \text{const}, \quad (9.24)$$

де $\gamma = C_p / C_v$.

Використовуючи рівняння Менделєєва-Клапейрона і рівняння адіабати, можна виразити рівняння Пуассона в координатах T - V і p - T :

$$TV^\gamma = \text{const} \quad p^{1/\gamma} T = \text{const} \quad (9.25)$$

Оскільки γ більше одиниці, то крива адіабати в координатах p - V спадає швидше ніж ізотерми (рис.9.5).

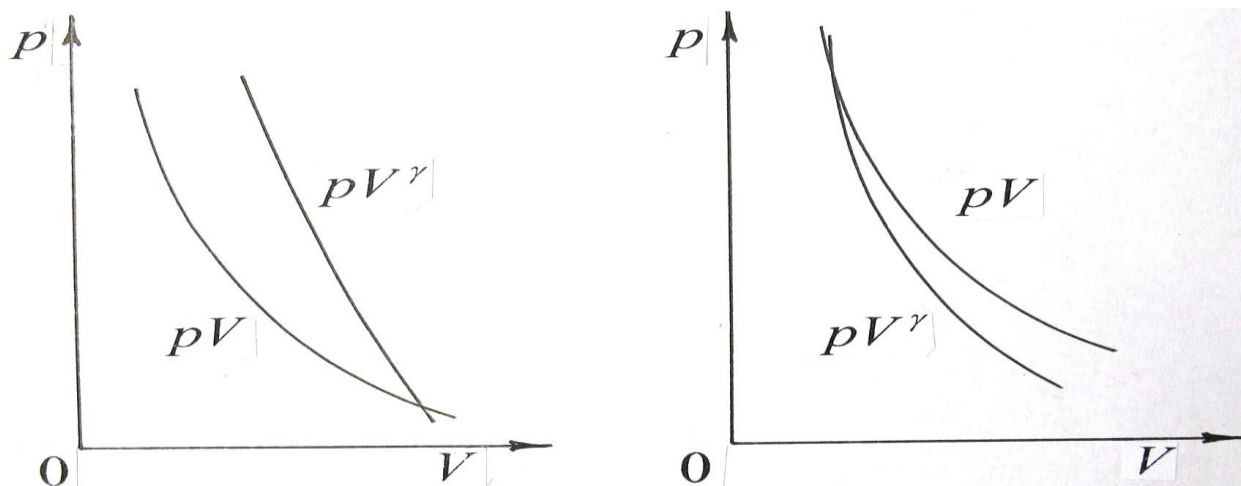


Рис.9.5

При адиабатичному розширенні газу частина внутрішньої енергії перетворюється на роботу, тобто:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{C}{V^\gamma} dV = \frac{C}{1-\gamma} \left(V_2^{1-\gamma} - V_1^{1-\gamma} \right) \quad (9.26)$$

Роботу при адиабатичному розширенні газу можна також знайти за формулою:

$$A = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{\gamma - 1} \quad (9.27)$$

9.6. Ефект Джоуля-Томсона. Зрідження газів

Внутрішня енергія ідеального газу визначається кінетичною енергією поступального руху молекул

$$U_i = \nu C_V \cdot T, \quad (9.28)$$

де $\nu = \frac{m}{M}$ — число молів; C_V — молярна теплоємність при постійному об'ємі.

Внутрішня енергія реального газу визначається також від'ємною потенціальною енергією взаємодії молекул і залежить від об'єму газу:

$$U = \nu C_V T - \frac{a}{V} \quad (9.29)$$

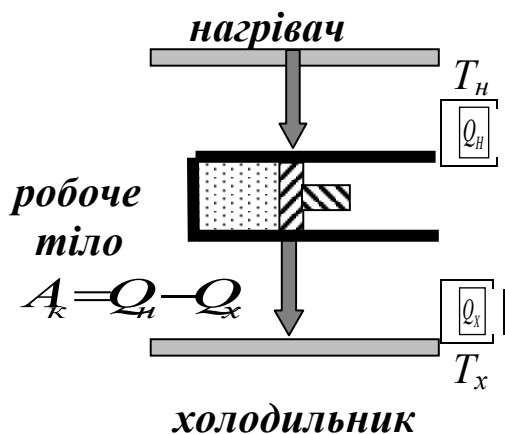
Дослідники Д. Джоуль (1818 – 1889) і У. Томсон (1824 – 1907) виявили, що при адиабатичному розширенні реального газу через по-

ристу перегородку з перепадом тисків (дроселюванні) він нагрівається або охолоджується. Ефект Джоуля-Томсона використовується для зрідження газів. Для зрідження газів з низькою критичною температурою використовують методи дроселювання та розширення стисненого газу з виконанням роботи.

Низькі температури і зріджені гази широко застосовуються в науці, техніці, медицині, сільському господарстві. Критична температура азоту нижча, ніж кисню, він раніше випаровується з рідкого повітря і в облозі залишається кисень. Фракційне випаровування повітря використовується для одержання азоту, гелію, неону, радону, аргону, криптону, ксенону. У кінці минулого століття виникла кріобіологія – наука, що вивчає дію низьких температур на живі організми і рослини, способи захисту живих клітин при заморожуванні та ін. Живі клітини рослин і тварин гинуть при охолодженні, що зумовлено руйнуванням мембрани клітин унаслідок утворення льоду всередині клітини. Для зберігання тривалий час при низьких температурах крові живих біологічних тканин, фрагментів нирок і кісток, хрящової та нервової тканини застосовують кріопротектори (гліцерин, гліколі) і охолодження з великою швидкістю (до 1000 К/с).

9.7 Теплова машина. Другий закон термодинаміки

Тепловою машиною називається пристрій, у якому енергія палива, що виділяється при його згорянні, перетворюється в механічну роботу. Теплова машина складається з трьох основних частин: *нагрівача, робочого тіла і холодильника* (рис. 9.6). Робоче тіло



одержує від нагрівача кількість теплоти Q_H і виконує корисну роботу A_k . Проаналізуємо роботу теплової машини: теплова машина працює циклами; в основі лежать декілька процесів; частина тепла передається холодильнику. Коефіцієнт корис-

Рис. 9.6

ної дії теплової машини (теплового двигуна) обчислюють за

формулою:

$$A_k = Q_n - Q_x \quad (9.30)$$

де $A_k = Q_n - Q_x$ – корисна робота, що виконується робочим тілом.

У 1824 р. французький військовий інженер Саді Карно (1796 – 1832) довів, що найбільш економічними є теплові машини, цикл яких складається з двох ізотерм T_n і T_x та двох адіабат 1–4 і 2–3 (рис.9.7).

Визначимо коефіцієнт корисної дії (*ккд*) циклу Карно. На ділянці 1 – 2 газ розширюється ізотермічно ($\Delta U = 0$), тому робота газу дорівнює кількості отриманої теплоти Q_n :

$$A_{12} = Q_n = R \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (9.31)$$

На ділянці 3 – 4 газ стискується ізотермічно і віддає теплоту Q_x :

$$A_{34} = Q_x = R \ln \frac{V_4}{V_3} \quad (9.32)$$

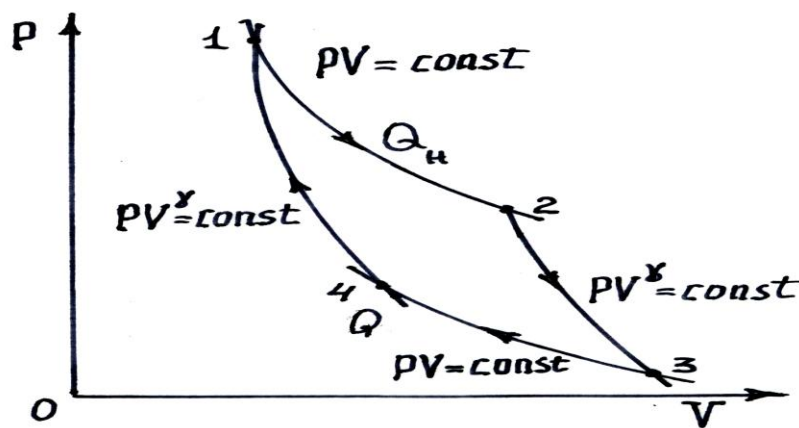


Рис.9.7

При адіабатичному розширенні 1 – 2 і стисненні 3 – 4 робота однакова, але різна за знаком, тому не вносить зміни в баланс теплоти і *ккд* циклу Карно:

$$\eta = \frac{Q_2 - Q_3}{Q_2} = \frac{T_H \ln \frac{V_2}{V_1} - T_X \ln \frac{V_3}{V_4}}{T_H \ln \frac{V_2}{V_1}} \quad (9.33)$$

Точки 1,2,3,4 одночасно належать як ізотермам, так і адіабатам, отже можна записати рівняння адіабат:

$$T_H \cdot V_2^\gamma = T_X \cdot V_3^\gamma, \quad T_H \cdot V_1^\gamma = T_X \cdot V_4^\gamma. \quad (9.34)$$

Поділивши почленно перший вираз на другий, отримаємо:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}. \quad (9.35)$$

Підставивши (9.35) у формулу (9.33), отримаємо:

$$\eta = \frac{T_H - T_X}{T_H} = 1 - \frac{T_X}{T_H}. \quad (9.36)$$

Теорема Карно:

- коефіцієнт корисної дії η_i ідеального теплового двигуна, що працює за циклами Карно, не залежить від природи робочого тіла і визначається тільки температурами нагрівача T_H і холодильника T_X ;
- коефіцієнт корисної дії η_i ідеального теплового двигуна, яка працює циклами Карно, завжди більший від ккд будь-якої реальної машини $\eta_i > \eta$.

Тепловими двигунами є: парові машини, парові і газові турбіни, реактивні двигуни, двигуни внутрішнього згорання і т. ін. Сучасні теплові машини працюють на базі різних процесів: цикл бензинового двигуна складається з двох адіабат і двох ізохор (рис.9.8,а); цикл дизеля – з двох адіабат, ізобари та ізохори (рис.9.8,б).

З формули (7.22) видно, що в корисну роботу перетворюється тільки частина підведеної до робочого тіла теплоти. За оцінками, близько 90 % потужностей у світі припадає на двигуни внутрішнього згорання. Після згорання палива, крім теплового забруднення, у вихлопних газах міститься до 200 різних хімічних речовин, у тому числі канцерогенних. Основним забруднювачем є свинець, який у вигляді тетраетилсвинцю додається до бензину для збільшення октанового

числа. Неетилований високооктановий бензин отримують створенням у ньому підвищеного вмісту молекул з розгалуженими ланцюгами, що досягається глибокою перегонкою нафти. У вихлопних газах за наявності надлишку кисню зростає концентрація NO. Ця проблема частково вирішується повторним введенням частини вихлопних газів до нової порції паливної суміші. Дизельне паливо містить більшу кількість сірки, яка при згорянні утворює оксиди. Сірка при взаємодії з водяною парою призводить до утворення сірчаної кислоти. У Західній Європі та США діють жорсткі обмеження на вміст сірки в бензині. Дизельне паливо фактично без сірки отримують завдяки поглибленій переробці нафти.

Другий закон термодинаміки було сформульовано на підставі аналізу роботи теплової машини.

Формулювання Кельвіна-Планка: *неможливо здійснити пристрій, який працює циклами, дія якого зводилась би тільки до виконання роботи за рахунок тепла, отриманого від нагрівача.*

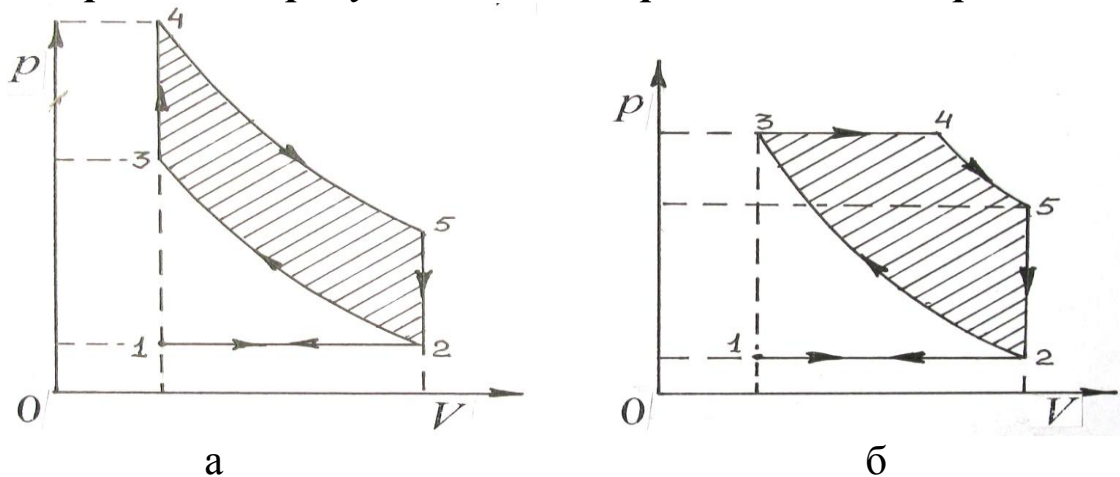


Рис.9.8

Формулювання Клаузіуса: *неможливо здійснити пристрій, який працює циклами, дія якого зводилась би до переносу тепла від холодного тіла до нагрітого, без виконання роботи.*

9.8. Ентропія. Статистична інтерпретація ентропії

Коефіцієнт корисної дії теплової машини, яка працює за оборотним циклом Карно:

$$1 - \frac{Q_x}{Q_H} = 1 - \frac{T_x}{T_H} \tag{9.37}$$

Запишемо цей вираз у формі:

$$\frac{Q_H}{T_H} + \left(-\frac{Q_C}{T_C} \right) = 0 \quad (9.38)$$

Фізична величина, яка визначається відношенням кількості теплоти, одержаної при сталій температурі, до температури, при якій відбувається теплопередача, називається зведеною кількістю теплоти. Для реального нестатичного необоротного процесу зведена кількість теплоти менша від нуля:

$$\frac{Q_H}{T_H} + \left(-\frac{Q_C}{T_C} \right) < 0. \quad (9.39)$$

Вирази (9.38) і (9.39) були отримані німецьким фізиком Клаузіусом (1822 – 1888). Перейшовши до замкнутого циклу, який утворюється при проходженні нескінченно великої кількості елементарних циклів, отримаємо нерівність Клаузіуса у загальному вигляді, тобто математичний запис другого закону термодинаміки: *сумарна зведена кількість теплоти при оборотному квазістатичному процесі дорівнює нулю, а при нестатичному – менше нуля.*

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0, \quad (9.40)$$

де δQ – прирощення кількості теплоти (кількість отриманої теплоти не характеризує однозначно термодинамічну систему, тобто не є функцією стану системи).

Функція стану термодинамічної системи S , прирощення якої dS (ΔS) дорівнює зведеній теплоті, отриманій при сталій температурі, називається ентропією:

$$dS = \frac{\delta Q}{T}; \quad \Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \quad (9.41)$$

Ентропія не залежить від шляху переходу, а визначається лише початковими і кінцевими параметрами стану. З формул (9.40) і (9.41) випливає, що зміна ентропії більше (необоротний процес) або дорівнює (оборотний процес) нулю:

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T}. \quad (9.42)$$

Якщо замкнена система не обмінюється енергією з навколишнім

середовищем, то $\delta Q = 0$ і за будь яких процесів $\Delta S = S_2 - S_1 = 0$

Другий закон термодинаміки стверджує, що всі процеси відбуваються у напрямку зростання ентропії, тобто такий процес є найбільш ймовірним. На основі статистичного аналізу термодинамічних процесів Л. Больцман встановив зв'язок між ентропією і ймовірністю стану, який називається законом Больцмана:

$$S = k \cdot \ln \Omega \quad (9.43)$$

де Ω – термодинамічна ймовірність стану, який має ентропію S ; k – стала Больцмана.

Термодинамічна ймовірність розраховується за формулою:

$$\Omega = \frac{Z^N}{N!} \quad (9.44)$$

де Z – число можливих станів; N – число частинок.

З формул (9.43) і (9.44) випливає, що найбільшою термодинамічною ймовірністю характеризується рівноважний стан, тобто найменш упорядкований стан.

Закони термодинаміки розповсюджуються і на біологічні структури. Живий організм перебуває у нерівноважному стані. Ця енергія запасена у вуглеводах і жирах їжі. З'єднуючись з киснем, вуглеводи утворюють воду і вуглекислий газ, вивільнюючи енергію. У біологічних системах процеси відбуваються при сталому тиску, тобто перший закон термодинаміки у диференціальній формі має вигляд:

$$dU = \delta Q - p dV \quad (9.45)$$

де величина $U + pV$ називається ентальпією системи.

Таким чином, у біологічних системах вивільнена в хімічних реакціях теплота визначається зміною ентальпії $\delta Q = dH$.

Зміст ентропії біологічних систем значно ширший, ніж поняття ентропії у газових процесах. Американський учений російського походження, лауреат Нобелівської премії (1977) Ілля Пригожин (1917 – 2003) розробив теорію нерівноважних систем. Згідно з теорією Пригожина, у стаціонарному стані швидкість зміни загальної ентропії відкритої біологічної системи дорівнює:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_e}{dt} + \frac{dS_i}{dt} \quad (9.46)$$

де dS_e – зміна внутрішньої ентропії системи; dS_z – зміна зовнішньої ентропії системи.

$$\frac{dS_e}{dt} = -\frac{dS_z}{dt}$$

У стаціонарному стані для стаціонарного випадку: Це означає, що

$$\frac{dS_e}{dt} = -\frac{dS_z}{dt} \quad (9.47)$$

Швидкість зміни ентропії всередині системи дорівнює швидкості її зміни внаслідок взаємодії організму із зовнішнім середовищем. Відповідно до теореми Пригожина, *в системі, яка перебуває в стаціонарному стані за незмінних зовнішніх умов, швидкість зростання ентропії за рахунок внутрішніх необоротних процесів приймає мінімальне, відмінне від нуля додатне значення:*

$$\frac{dS_e}{dt} \Rightarrow \text{min} \quad (9.48)$$

При відхиленні системи від стаціонарного стану наростають процеси, які намагаються повернути її в стан до мінімуму ентропії. У ході необоротних процесів перетворення та дисипації (розсіяння) енергії у багатокомпонентній системі можуть виникати структури, які не властиві для стану термодинамічної рівноваги, тобто виникають процеси самоорганізації. *Галузь науки, що займається вивченням загальних закономірностей у макроскопічних системах, називається синергетикою.*

Контрольні запитання

1. Що вивчає термодинаміка?
2. Що називається термодинамічною системою?
3. Які параметри характеризують термодинамічні системи?
4. Що називається внутрішньою енергією термодинамічної системи?
5. Як розрахувати внутрішню енергію ідеального газу?
6. Що називається теплопередачею?
7. Яким способом ще можна змінити внутрішню енергію системи?
8. За якою формулою можна розрахувати зміну внутрішньої енергії термодинамічної системи?
9. Що називається питомою теплоємністю речовини?
10. Що називається молярною теплоємністю речовини?

11. Запишіть формулу Майєра.
12. Сформулюйте перший закон термодинаміки.
13. Застосуйте перший закон термодинаміки до ізопроцесів у газах.
14. Що називається фазою? Наведіть приклади.
15. При яких фазових переходах поглинається теплота, виділяється
Теплота і чому?
16. Чому під час снігопаду температура повітря підвищується?
17. Чому плавець, що вийшов з води, відчуває холод?
18. Який процес називається адіабатичним?
19. Запишіть рівняння Пуассона.
20. У чому полягає ефект Джоуля-Томсона?
21. Що називається тепловим двигуном? Назвіть основні частини
теплового двигуна.
22. Запишіть формулу ККД теплового двигуна.
23. Наведіть приклади теплових двигунів.
24. Що називають ентропією. Чому в реальних процесах ентропія
зростає?
25. Запишіть формулу закону Больцмана.
26. Що таке термодинамічна ймовірність?
27. Сформулюйте теорему Пригожина.

10. ТВЕРДИЙ СТАН РЕЧОВИНИ

Більшість твердих тіл у природі має кристалічну будову, яка характеризується строгою періодичністю в розташуванні атомів (молекул, іонів) у просторі. Таке розташування одержало назву **дальнього порядку**. Характерна особливість кристалічного стану – **анізотропія**, тобто залежність деяких фізичних властивостей від напрямку.

Ізотропні тверді тіла являють собою переохоложені рідини. Причина анізотропії кристалів – наявність кристалічної решітки, яка іноді виявляється у правильному зовнішньому огрануванні кристалів. Зовнішнє огранування і анізотропія кристалів часто не виявляються, тому що, як правило, тіла трапляються у вигляді полікристалів, які складаються з великої кількості безладно орієнтованих кристаликів.

У монокристалі частинки утворюють кристалічну решітку, у вузлах якої знаходяться атоми (рис.10.1,а). Такий кристал можливо отримати шляхом багатократного повторення у трьох напрямках елементарної кристалічної решітки (рис.10.1,б). Природні монокристали досягають великих розмірів. Штучні монокристали широко ви-

користовуються в сучасній науці і техніці. Маса вирощених у Харківському НТК «Інститут монокристалів» іонних та органічних монокристалів, які використовують в ядерних дослідженнях, досягає тонни.

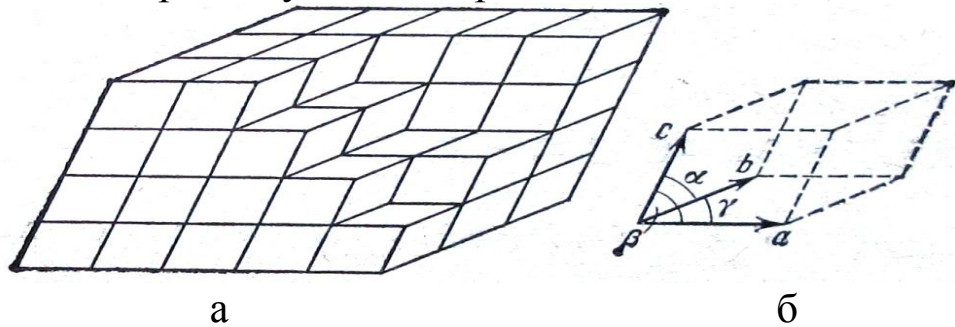


Рис.10.1

У кристалах густина розміщення частинок у різних напрямках різна. Цим зумовлена анізотропія властивостей кристалів. Залежно від природи атомів та характеру взаємодії між ними розрізняють іонні, атомні, металічні та молекулярні кристали.

Важливою властивістю твердих тіл є симетрія – здатність решітки збігатися з собою внаслідок переміщення, обертання навколо осей, дзеркального відображення відносно певних площин та ін. Залежно від можливих видів симетрії та розмірів ребер a, b, c і кутів α, β, γ (рис.10.1), кристали поділяють на сім кристалографічних систем (сингоній). З урахуванням можливих елементів симетрії російський учений Є.С. Федоров показав, що існує 230 комбінацій елементів симетрії (просторові групи), які розбиваються на 32 класи. На рис.10.2 зображені кристалічні решітки більшості металів: кубічна об'ємно-центрована (рис.10.2,а), гранецентрована (рис.10.2,б), гексагональна щільна (10.2,в).

Теоретичні розрахунки показують, що міцність ідеального кристала приблизно в 1000 разів більше, ніж реальна. Так теоретична міцність сталі на зсув становить:

$$\frac{\sigma_{теор}}{\sigma_{реал}} \approx 1000$$

Реальна міцність сталі, яка не піддавалась термообробці $\approx 4 \cdot 10^8 \text{ Па}$

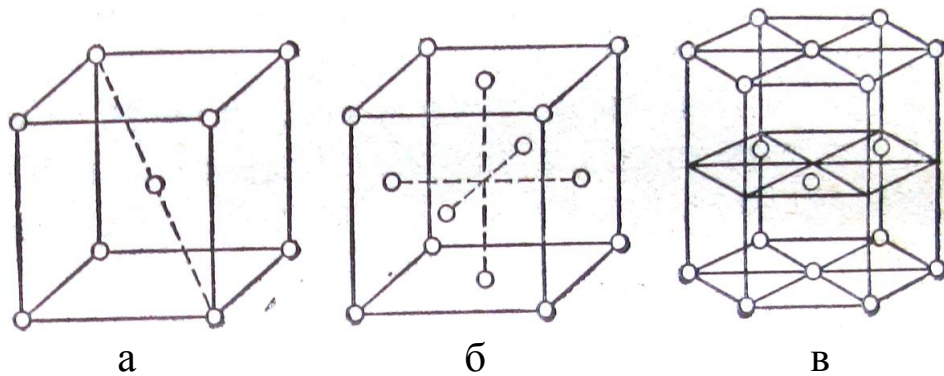
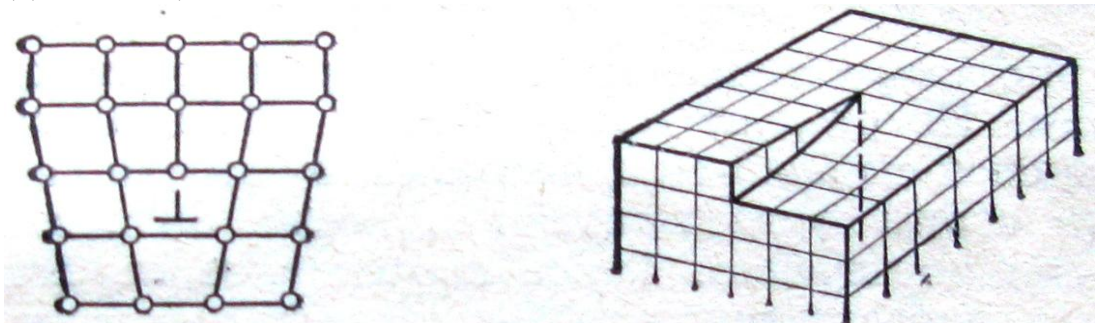


Рис.10.2

Така розбіжність пояснюється порушенням ідеальної кристалічної структури – точковими і особливо лінійними дефектами. До точкових дефектів належать вакансії (відсутність атома у вузлі), атоми заміщення, атоми у міжвузлі. Точкові дефекти порушують ближній порядок, не зачіпаючи дальнього, а їх концентрація експоненціально зростає з температурою.

Лінійні дефекти (дислокації) виявляються в тому, що одна з атомних площин обривається – порушується чергування кристалічних площин. Найпростішими видами дислокацій є крайова (рис.10.3,а) та гвинтова (рис.10.4,б) дислокації. Крайова дислокація обумовлена залишковою півплощиною, яка вставлена між сусідніми шарами атомів. Лінія дислокації перпендикулярна до площини рисунка, пряма позначена так: \perp . Такі дефекти дуже знижують міцність – пластична деформація реальних кристалів спостерігається при значно менших механічних напругах тому, що міжатомні зв'язки руйнуються не одночасно, а по черзі (рис. 10.4). Таке переміщення атомів по черзі можна представити як рух дислокації.

Гвинтову дислокацію можна вважати результатом розрізання кристала по півплощині і зсуву частин решітки на один період (рис.10.4,б). Кристал з гвинтовою дислокацією фактично складається з однієї кристалічної площини, яка зігнута за хвильовою площиною. Лінія дислокації збігається з віссю гвинта.



а

б

Рис.10.3

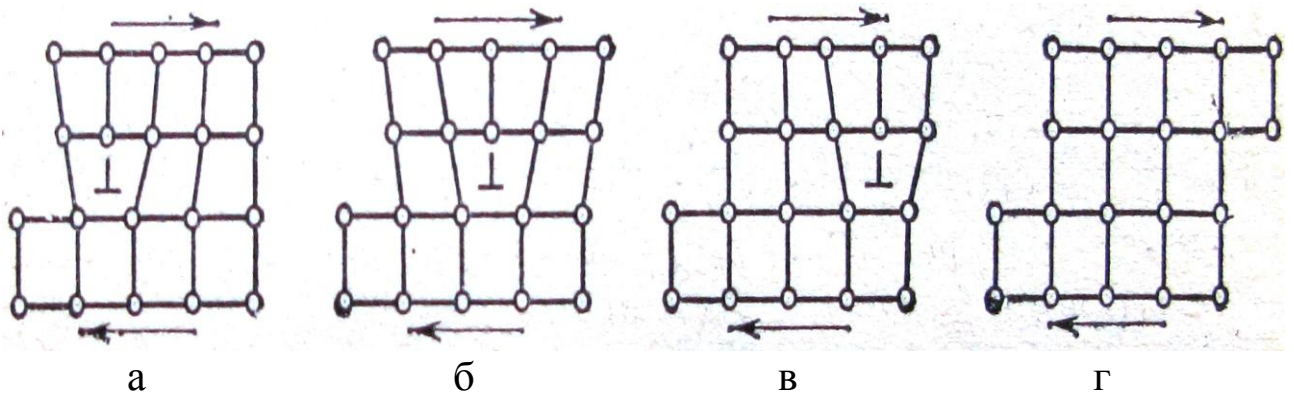


Рис.10.4

Взагалі лінії дислокацій криві і складаються з крайових і гвинтових компонентів. На рис.10.5 представлено електронно-мікроскопічний знімок дислокаційної структури в берилії після деформації і відпалу. Дислокації утворюють сітчасті структури і малюкутові границі блоків.

Механізм перенесення маси в твердих тілах відрізняється від механізму перенесення в рідині і газах. Для переходу атома з вузла кристалічної решітки у вакантний вузол атом повинен володіти значною енергією коливального руху, тому залежність коефіцієнта дифузії від температури виражається експоненціальним законом

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{\Delta W}{kT}\right) \quad (10.1)$$

де D_0 – стала, яка залежить від природи речовини; ΔW – кінетична енергія атома.

Механізм теплопровідності теж відрізняється від теплопровідності газів. У твердих тілах (діелектриках і напівпровідниках) передача тепла здійснюється завдяки коливанням атомів кристалічної решітки.

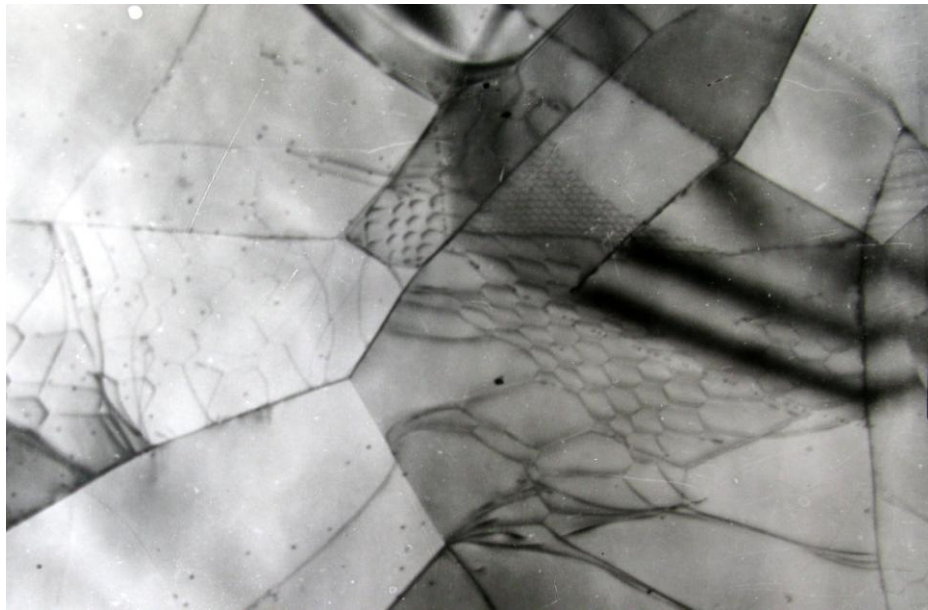


Рис.10.5

У металах теплопровідність і електропровідність забезпечується вільними, тобто валентними електронами.

При достатньо високій температурі внутрішня енергія одного моля кристалічної решітки твердого тіла визначається енергією коливань частинок навколо вузлів кристалічної решітки.

$$W = W_k + W_n \quad (10.2)$$

де W_k – кінетична енергія; W_n – потенціальна енергія.
Молярна теплоємність кристалічної решітки становить:

$$C_v = \frac{dU}{dT} = 3R \quad (10.3)$$

Теплоємність хімічно простих кристалічних тіл однакова і не залежить від температури. Цей закон, що встановили французькі фізики П. Дюлонг (1785 – 1838) і А. Пті (1791 – 1820), виконується для більшості хімічних елементів і простих сполук при температурах вище кімнатної (рис.10.6). При пониженні температури теплоємність перестає підкорятися закону Дюлонга і Пті та прямує до нуля пропорційно T^3 у діелектриках та напівпровідниках і пропорційно T у металах. Температура, при якій теплоємність решітки набуває значення $3R$, є характеристичною (для різних речовин) температурою Дебая θ . Для більшості кристалів температура Дебая коли-

вається в інтервалі температур 100 – 450 К. Виняток становлять алмаз ($\theta = 2200 \text{ K}$), берилій (1000 К), кремній ($\theta = 640 \text{ K}$), хром (610 К).

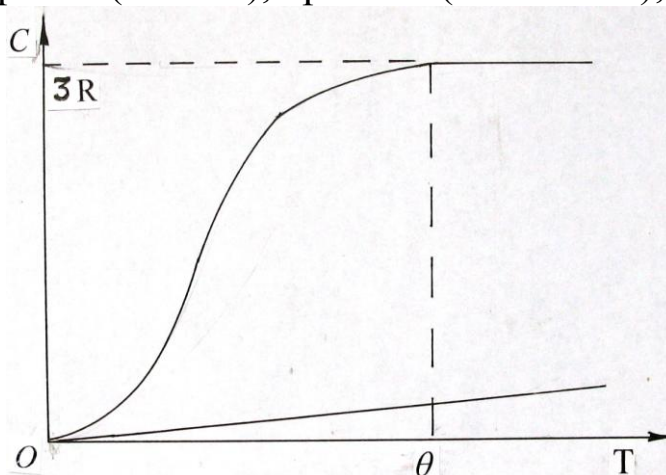


Рис.10.6

Квантова теорія теплоємності Ейнштейна-Дебая враховує взаємну залежність коливань і квантування енергії частинок кристалічної решітки. Згідно з теорією, при низьких температурах виморожуються ступені вільності, внаслідок чого теплоємність зменшується. При температурі Дебая збуджуються всі коливальні ступені вільності і при подальшому збільшенні температури зростає тільки амплітуда коливань атомів. Таким чином, температура Дебая характеризує перехід від квантових властивостей кристалів до класичних.

Контрольні запитання

1. Що називається дальнім порядком у кристалі?
2. Що називається анізотропією?
3. Що називається симетрією?
4. Які види дефектів кристалічної будови ви знаєте?
5. Вакансія, атом заміщення, атом у міжвузлі.
6. Дислокація у кристалі. Які існують види дислокацій?
7. Запишіть формулу залежності коефіцієнта дифузії твердого тіла від температури.
8. Який механізм теплопровідності в діелектриках?
9. Який механізм теплопровідності в металах?
10. Чому дорівнює внутрішня енергія твердого тіла?
11. Запишіть формулу закону Дюлонга і Пті.

11. ЕЛЕКТРОСТАТИКА

11.1. Електричний заряд. Закон Кулона

Електростатика – розділ електродинаміки, у якому вивчають взаємодію заряджених тіл, які знаходяться у спокої у даній інерціальній системі відліку. Важливим поняттям є електричний заряд.

Усі тіла у природі електризуються, тобто можуть здобути електричний заряд. Наявність електричного заряду полягає у тому, що заряджені тіла взаємодіють між собою – притягаються або відштовхуються.

Існування електромагнітної взаємодії відоме з глибокої давнини. Так, у VII ст. нашої ери грецький вчений Фалес з міста Мілети спостерігав притягування легких предметів до бурштинової палички при її натиранні вовною. Джерелом електромагнітної взаємодії є електричний заряд.

Електричний заряд – фізична величина, що є мірою електромагнітної взаємодії. Електричний заряд – джерело електромагнітного поля. Іноді зарядом називають також заряджене тіло або кількість електрики – q .

У природі існує два види електричних зарядів. Одні з них умовно називають позитивними, а другі – негативними. Скляна паличка, натерта шовком, здобуває позитивний заряд, бурштинова паличка, натерта вовною, – негативний заряд.

Існування двох видів зарядів стало зрозумілим після встановлення на початку XX ст. структури атома. Атом будь-якої речовини складається з позитивно зарядженого ядра і негативно заряджених елементарних часток – електронів. Ядра атомів складаються з позитивно заряджених протонів і нейтронів, які не мають заряду. Число протонів дорівнює числу електронів, тому атоми нейтральні (не мають заряду).

Явище електризації тіл можна пояснити тим, що при тісному контакті тіл, які виготовлені з різних речовин, відбувається перехід електронів з однієї речовини в іншу. Тертя сприяє збільшенню ділянок тіл з тісним контактом. Електризація тіл відбувається при порушенні рівноваги між числом протонів і числом електронів.

Наелектризувати тіло можна двома засобами:

• *Тертям* (зіткненням) тіл, виготовлених з різних речовин. Натирають тіла для того, щоб збільшити площу зіткнення.

• *Через вплив.* У цьому випадку використовують явище електростатичної індукції: тіло розміщують в електростатичному полі – однойменні заряди відштовхуються і накопичуються на його протилежних сторонах.

Експериментально доведено:

- існують заряди двох видів (позитивні і негативні);
- однойменні заряди відштовхуються (рис.11.1), різнойменні заряди притягуються (рис.11.2);
- заряди завжди з'являються (виникають) і зникають парами;
- нейтральні тіла містять однакову кількість різнойменних зарядів;
- існує мінімальний електричний заряд $e = \pm 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; заряджені тіла містять ціле число таких зарядів $q = \pm Ne$;
- електричний заряд – внутрішня властивість елементарних частинок.



Рис. 11.1



Рис. 11.2

Експерименти свідчать, що у природі виконується закон збереження електричного заряду: алгебраїчна сума усіх зарядів ізолюваної системи не змінюється. Аналітичний запис закону збереження заряду має вигляд:

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = const$$

$$\text{або } \sum_{i=1}^n q_i = const. \quad (11.1)$$

Виявити наявність електричного заряду можна за допомогою приладу, що називається електрометром (рис.11.3)

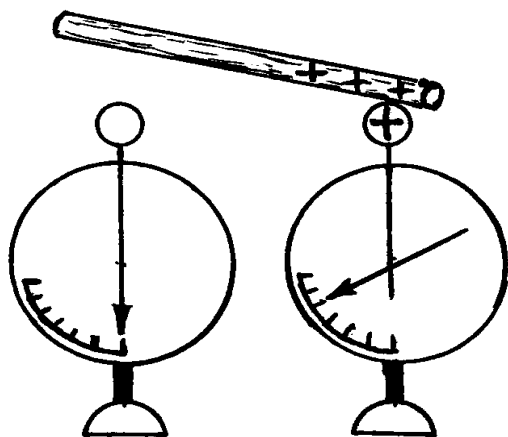


Рис. 11.3

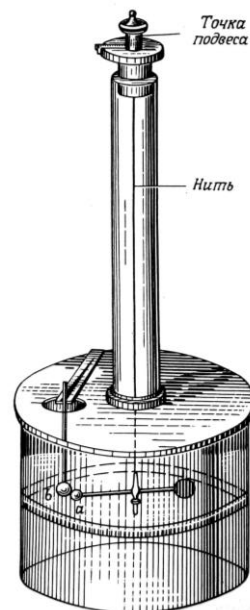


Рис. 11.4

Закон взаємодії електричних зарядів експериментально був встановлений Шарлем Кулоном у 1785 р. за допомогою крутильних ваг (рис.11.4). Сформулюємо закон Кулона.

Сили, з якими взаємодіють два точкових електричних заряди (у вакуумі), прямо пропорційні добутку модулів зарядів, обернено пропорційні квадрату відстані між ними і спрямовані уздовж прямої, що з'єднує заряди:

$$F = k_0 \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (11.2)$$

Коефіцієнт пропорційності k_0 залежить від вибору системи одиниць. У міжнародній системі одиниць вимірювання СІ коефіцієнт k_0 записують у вигляді:

$$k_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Нм}^2}{\text{Кл}^2}, \quad (11.3)$$

де $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}/(\text{Н} \cdot \text{м}^2)$ – електрична стала.

Закон Кулона виконується в будь-якій інерціальній системі.

Особливості закону Кулона:

- електричні заряди знаходяться у спокої (нерухомі) у даній інерціальній системі відліку;
- електричні заряди – точкові.
- електрична взаємодія передається миттєво.

Точковим електричним зарядом називається заряджене тіло, розмірами і формою якого можна знехтувати порівняно з відстанню між зарядами.

Контрольні запитання

1. Що вивчає електростатика?
2. Як можна наелектризувати тіло?
3. Які властивості електричних зарядів ви знаєте?
4. Які види зарядів існують у природі?
5. Чому атоми не мають електричного заряду?
6. Які заряди називають однойменними?
7. Які заряди називають різнойменними?
8. Які види електризації ви знаєте?
9. Сформулюйте закон збереження заряду.
10. Сформулюйте закон Кулона.
11. Запишіть формулу закону Кулона.

11.2. Електричне поле. Напруженість. Принцип суперпозиції полів

Експерименти свідчать, що наелектризовані тіла взаємодіють на відстані. Англійські фізики Фарадей і Максвелл довели, що властивості простору навколо зарядженого тіла змінюються – виникає електростатичне поле. Наші органи почуттів не сприймають електричних полів. Однак існування електричного поля можна виявити за його дією на заряджені тіла, наприклад, на заряджену кульку, що підвішена на тонкій шовковій нитці.

Для вивчення структури електричних полів заряджених тіл використовують пробні електричні заряди. Пробний електричний заряд – це точковий позитивний заряд, величина якого, за модулем, набагато менше заряду даного тіла.

Якщо в одній і тій же точці електростатичного поля поміщати пробні заряди q_1 , q_2 , і q_3 , то поле буде діяти на них із силами F_1 , F_2 і F_3 . Експерименти свідчать, що **відношення сили до величини заряду не залежить від матеріалу, розмірів і форми пробного заряду**. Це відношення характеризує електричні властивості даної точки простору (поля):

$$\frac{F_1}{q_1} = \frac{F_2}{q_2} = \frac{F_3}{q_3} = \text{const.}$$

Напруженість електричного поля \vec{E} – векторна фізична величина, що чисельно дорівнює відношенню сили, з якою поле діє на поміщений у даній точці простору позитивний заряд q_0 , до модуля цього заряду. Напрямок вектора напруженості збігається з напрямком сили, що діє на позитивний заряд у даній точці поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}. \quad (11.4)$$

Одиниця напруженості електричного поля

$$\boxed{E} \left[\frac{H}{Kл} = \frac{B}{м} \right].$$

За формулою (11.4) можна знайти напруженості полів точкового заряду або зарядженої кулі:

$$E = \kappa_0 \frac{qq_0}{r^2 \cdot q_0} = \kappa_0 \frac{q}{r^2}. \quad (11.5)$$

Якщо електричний заряд рівномірно розподілений по поверхні кулі радіусом R з поверхневою щільністю $\sigma = q/S$, то напруженість поля такої кулі:

$$E = \frac{\kappa_0 \cdot \sigma \cdot S}{r^2} = \frac{\kappa_0 \cdot 4\pi R^2 \sigma}{r^2} = \frac{\sigma \cdot R^2}{\varepsilon_0 r^2}. \quad (11.6)$$

Напруженість електричного поля $E = \sigma/\varepsilon_0$ на поверхні кулі $r = R$ не залежить від радіуса кулі.

Якщо електричне поле створюють кілька зарядів, то поля накладаються. У цьому полягає принцип суперпозиції (накладення) полів: **напруженість електричного поля системи точкових зарядів у будь-якій точці дорівнює векторній сумі напруженості полів усіх зарядів:**

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i. \quad (11.7)$$

Отримаємо аналітичний вираз для напруженості електричного поля системи з двох різнойменних електричних зарядів.

Електричним диполем називається система із двох рівних за модулем різнойменних зарядів, які розташовані на деякій відстані ℓ один від одного (рис. 11.5). Електричний диполь характеризується дипольним електричним моментом \vec{p}_e .

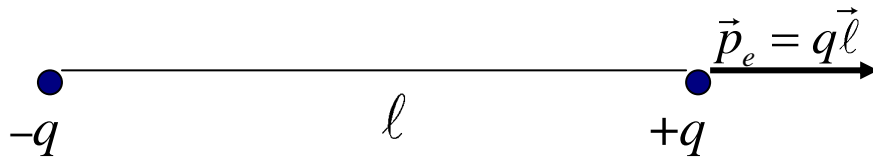


Рис 11.5

Дипольний момент дорівнює добутку заряду на відстань між центрами зарядів $\vec{p}_e = q\vec{\ell}$, де ℓ – плече диполя. Вектор $\vec{\ell} = \ell \cdot \vec{n}$, напрямлений вздовж плеча диполя від негативного до позитивного заряду.

Напруженість поля в будь-якій точці простору на осі диполя напрямлена вздовж осі диполя і дорівнює $\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_-$.

Використовуючи закон Кулона для точкового заряду, можна дістати формулу напруженості поля електричного диполя на відстані r від середини диполя:

$$E = \frac{k_0 q}{(r - \ell/2)^2} - \frac{k_0 q}{(r + \ell/2)^2} = \frac{2k_0 q \ell r}{(r^2 - \ell^2/4)^2}. \quad (11.8)$$

У більшості задач плече диполя набагато менше від віддалі до точки, в якій визначається поле $r \ll \ell$, тому, нехтуючи доданком $\ell^2/4$ та зважаючи, що $p_e = q \cdot \ell$, отримаємо:

$$E = \frac{2k_0 p_e}{r^3}. \quad (11.9)$$

Розглядаючи довільне розташування точки М відносно осі диполя, можна зробити висновок, що на великих відстанях від

центру диполя напруженість поля обернено пропорційна кубу відстані.

$$E = \frac{Const \cdot p_e}{r^3}. \quad (11.10)$$

Для наочного зображення електромагнітних полів Фарадей запропонував використовувати силові лінії.

Силова лінія – лінія, дотична до якої у кожній точці збігається з напрямком вектора напруженості. Щільність (густина силових ліній) пропорційна модулю напруженості. Силові лінії починаються на позитивних зарядах і закінчуються на негативних.

Якщо вектори напруженості у всіх точках електричного поля рівні за модулем і напрямком, тоді поле – однорідне. Силові лінії однорідного поля паралельні, а їхня щільність однакова. Якщо вектори напруженості відрізняються за модулем і напрямком, то поле – неоднорідне. На рис.11.6а, 11.6б показані силові лінії електричних полів відокремлених позитивного та негативного зарядів. На рис. 11.6в, 11.6г показані електричні поля системи двох різнойменних і двох однойменних зарядів.

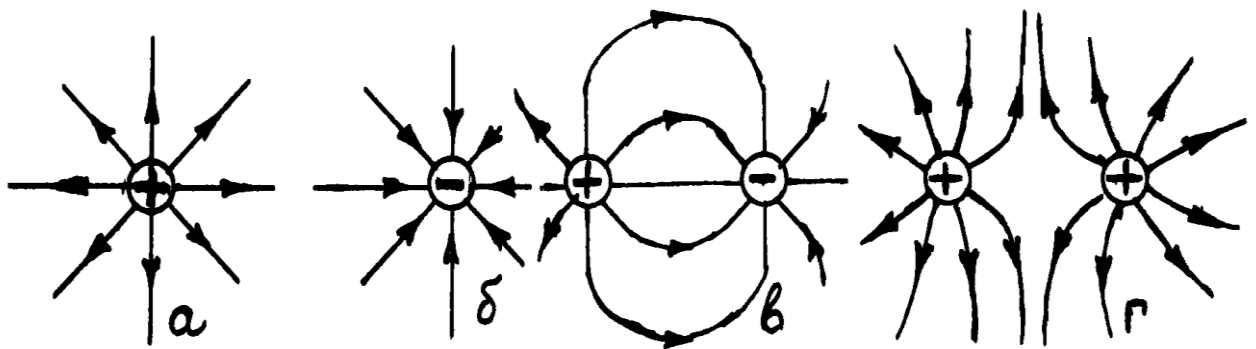


Рис. 11.6

11.3. Провідники і діелектрики в електричному полі

За електричними властивостями всі речовини поділять на **провідники, діелектрики і напівпровідники**. Провідниками називають речовини, які проводять електричний струм. Речовини, які не проводять електричний струм, називаються діелектриками. Напівпровідники займають проміжне положення між провідниками

і діелектриками. Провідниками є всі метали і електроліти, розчини і розплави солей, кислот, лугів. Діелектриками є пластмаси, скло, порцеляна, гума, шовк, нафтопродукти, ебоніт.

Провідники проводять електричний струм тому, що в них є вільні носії заряду: електрони та іони. Під дією електричного поля вільні носії легко переміщуються по провіднику. У результаті електростатичного відштовхування заряди накопичуються на поверхні зарядженого провідника (рис. 11.7).

Якщо провідник помістити в зовнішнє електричне поле, то вільні носії у провіднику (у металах електрони) будуть рухатися доти, поки поле носіїв зарядів не компенсує зовнішнє електричне поле (рис. 11.8). Електричне поле усередині провідника буде дорівнювати нулю. Якщо провідник, що перебуває у електричному полі, розділити на дві половини, ці частини будуть заряджені різнойменними зарядами. При вимиканні електричного поля ці частини залишаються зарядженими.

Поділ зарядів у провіднику в електричному полі називається явищем електростатичної індукції.

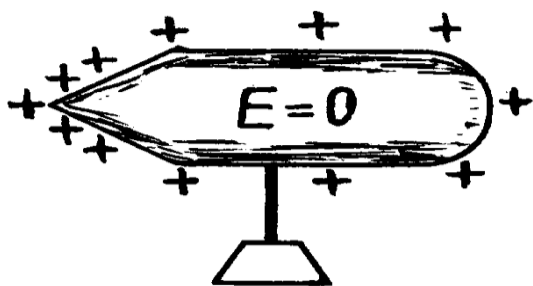


Рис. 11.7

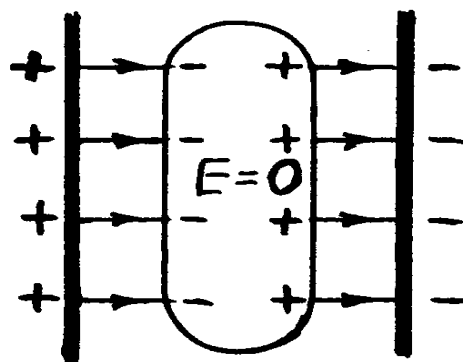


Рис. 11.8

Усередині діелектрика майже немає вільних носіїв заряду, й електрони мають можливість рухатися тільки в межах молекули. Унаслідок цього у молекул виникають електричні дипольні моменти.

Деякі молекули, наприклад молекули води, мають власний (спіновий) **дипольний електричний момент**. Такі молекули називаються **полярними**. В інших молекулах (**неполярних**) дипольний момент індукується (з'являється) тільки у зовнішньому електричному полі. В електричному полі диполі орієнтуються уздовж напрямку поля (рис. 11.9). Таким чином, у діелектрику

виникає внутрішнє поле, що частково компенсує зовнішнє (рис. 11.10) а на зовнішніх поверхнях діелектрика з'являються заряди протилежного знака (рис. 11.10).

Виникнення зв'язаних зарядів на поверхні діелектрика, поміщеного в електричне поле, називається явищем поляризації. Якщо діелектрик розділити на дві половини в електричному полі, то на поверхнях, що утворилися, виникають заряди протилежного знака. При вимиканні електричного поля заряди зникнуть.

Зменшення електричного поля в діелектрику характеризується відносною діелектричною проникністю.

Діелектрична проникність ε показує, у скільки разів напруженість електричного поля в ізотропному діелектрику E менше, ніж напруженість поля E_0 у вакуумі:

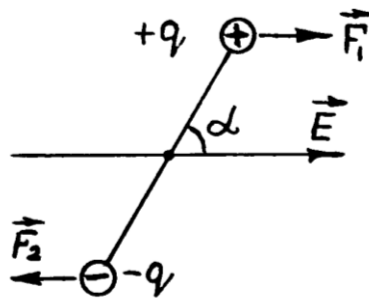


Рис. 11.9

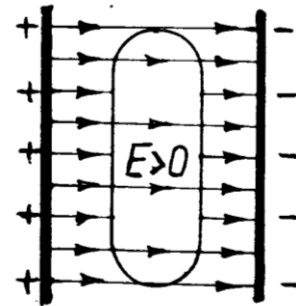


Рис. 11.10

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}. \quad (11.11)$$

У діелектрику сила взаємодії зарядів зменшується в ε разів:

$$F = k_0 \frac{q_1 q_2}{\varepsilon \cdot r^2}. \quad (11.12)$$

Контрольні запитання

1. Яке електричне поле називається електростатичним?
2. Що таке електричний заряд?
3. Який заряд називається пробним?
4. Що таке напруженість електричного поля?
5. Напишіть формулу напруженості електростатичного поля точкового заряду.
6. Що таке силова лінія?

7. У чому полягає принцип суперпозиції електричних полів?
8. Які речовини називаються провідниками?
9. Які речовини називаються діелектриками?
10. Нарисуйте силові лінії електричного поля двох однойменних точкових зарядів.
11. Нарисуйте силові лінії електричного поля двох різнойменних точкових зарядів.
12. Які властивості електричних зарядів ви знаєте?

11.4. Робота сил електричного поля. Потенціал. Різниця потенціалів

Одержимо формулу для розрахунку роботи сил електричного поля для переміщення заряду. Елементарна робота для переміщення заряду q на відстань $d\ell$ під кутом α до силової лінії описується формулою (рис. 11.):

$$dA = F \cdot d\ell \cos \alpha = qE \cdot d\ell \cos \alpha. \quad (11.13)$$

Робота для переміщення заряду у неоднорідному полі точкового заряду з точки 1 у точку 2:

$$A_{12} = q \int_1^2 E d\ell \cos \alpha = q \int_1^2 E dr. \quad (11.14)$$

Підставимо значення напруженості поля точкового заряду:

$$A_{12} = q \int_1^2 \frac{k_0 q}{\epsilon r^2} \cdot dr = -k_0 q \left(\frac{1}{\epsilon r_2} - \frac{1}{\epsilon r_1} \right) = -W_2 - W_1, \quad (11.15)$$

де $W^n = k_0 \frac{q}{\epsilon r}$ – потенціальна енергія заряду у полі.

З формули (11.12) випливає, що **робота електричного поля для переміщення заряду не залежить від форми шляху, а залежить тільки від положення початкової і кінцевої точок.** якщо точковий заряд рухається по замкненій траєкторії (контур) ℓ , то виконана сумарна робота дорівнює нулю:

$$\oint_{\ell} q E d\ell \cos \alpha = q \oint_{\ell} \vec{E} d\vec{\ell} = 0. \quad (11.16)$$

Інтеграл виду $\oint_{\ell} \vec{E} d\vec{\ell}$ називається **циркуляцією вектора напруженості** електричного поля по замкненому контуру ℓ .

Фізичні поля, у яких робота не залежить від форми шляху, називаються потенціальними. В таких силових полях вводять енергетичну характеристику – потенціал.

Потенціал – скалярна фізична величина, що чисельно дорівнює потенціальній енергії одиничного заряду (заряду у 1 Кл) в даній точці поля:

$$\varphi = \frac{W^n}{q}. \quad (11.17)$$

Формулу (11.15) можна записати через різницю потенціалів

$$A_{12} = -q \varphi_2 - \varphi_1 = q \varphi_1 - \varphi_2 ; dA = -q \cdot d\varphi. \quad (11.18)$$

За законом збереження енергії робота є мірою зміни енергії, тому **потенціал електричного поля чисельно дорівнює роботі, виконаній полем при переміщенні одиничного заряду (1 Кл) з даної точки поля на нескінченно велику відстань:**

$$\varphi = \frac{A_{1\infty}}{q}. \quad (11.19)$$

Одиницею потенціалу і різниці потенціалів в СІ є вольт:

$$\boxed{[\varphi]} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В}. \quad (11.20)$$

Нехай заряд $+q$ переміщується в однорідному полі по шляху ℓ на відстань $d\ell$ (рис. 11.14). Елементарна робота, що виконує електричне поле, дорівнює:

$$dA = F \cdot d\ell \cos \alpha = E \cdot q \cdot d\ell \cos \alpha, \quad (11.21)$$

де $d\ell \cos \alpha = dr$; dr – відстань уздовж силової лінії, тоді:

$$dA = qE \cdot dr. \quad (11.22)$$

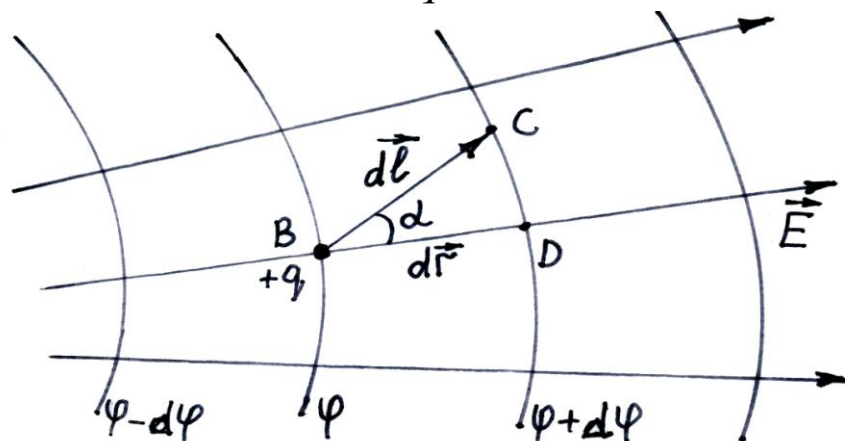


Рис. 11.14

Таким чином, електричне поле виконує роботу при переміщенні заряду під кутом до силових ліній електричного поля.

Під час переміщення заряду по поверхні, що перпендикулярна силовим лініям, електричне поле роботи не виконує. Така поверхня ($\varphi = \text{const}$) називається еквіпотенціальною.

З формули (11.15) випливає, що потенціал зарядженої кулі на відстані r дорівнює:

$$\varphi = k_0 \frac{q}{\varepsilon r} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r}. \quad (11.23)$$

При визначенні роботи електричного поля для переміщення заряду з однієї точки поля в іншу використовують поняття різниці потенціалів.

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q}. \quad (8.24)$$

З формул (11.18) і (11.22) можна знайти зв'язок між напруженістю і потенціалом для однорідного електричного поля:

$$qE \cdot dr = -q \cdot d\varphi, \quad (11.25)$$

звідки:

$$E = -\frac{d\varphi}{dr}. \quad (11.26)$$

Величину $\frac{d\varphi}{dr}$, яка характеризує зміну потенціалу в напрямі силової лінії поля, називають **градієнтом потенціалу** і позначають $\text{grad}\varphi$. Якщо силові лінії розташовані під кутом до осей координат, то градієнтний зв'язок між напруженістю і потенціалом записують у вигляді:

$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z} \vec{k} \right) = -\text{grad}\varphi. \quad (11.27)$$

де від'ємний знак вказує на те, що вектор напруженості і градієнта протилежні за напрямом. В однорідному полі:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = \frac{U}{d}. \quad (11.28)$$

З формули (11.27) випливає, що *напруженість електричного поля за модулем чисельно дорівнює зміні потенціалу на одиницю довжини уздовж силової лінії.*

Біопотенціали рослин

Всі рослини здатні до повільних «ростових згинів», необхідних для того, щоб адаптуватися до освітлення, напрямку сили тяжіння. Деякі рослини здійснюють добові періодичні рухи, швидко реагують на світло, дотик, коливання та інші подразники.

Між внутрішніми та зовнішніми поверхнями мембран кліток, завдяки різному іонному складу і проникності іонів крізь мембрани, виникає різниця потенціалів 80 – 100 мВ. Під дією зовнішніх подразників мембрана збуджується – зростає її проникність для іонів Ca^{++} . Іони кальцію керують фактично всіма функціями клітини, тому що живі клітини підтримують в цитоплазмі мінімальний рівень іонів кальцію у вільному стані. Якщо порушується необхідний баланс, то самі іони перетворюються на зброю знищення клітини.

Біоелектричні потенціали, які генерують деревні рослини, тісно пов'язані з процесами обміну речовин і можуть виступати показниками їх життєздатності. Для визначення фізіологічного стану дерев вимірюють різницю біопотенціалів між кореневою шийкою та вершиною рослини поточного або попереднього року.

Внаслідок дифузії води крізь кліткову мембрану тиск всередині клітки змінюється і може досягати $5 \cdot 10^6$ Па, що у 50 разів вище атмосферного. Зменшення концентрації іонів кальцію всередині клітини в процесі збудження супроводжується падінням внутрішньоклітинного тиску.

Контрольні запитання

1. Чому дорівнює робота електричного поля для переміщення електричного заряду?
2. Що таке потенціал електричного поля? Яка одиниця потенціалу?
3. Що таке різниця потенціалів? В яких одиницях виміряється?
4. Які основні характеристики електростатичного поля ви знаєте?
5. Який зв'язок між напруженістю і різницею потенціалів?

11.5. Електроємність. Конденсатори

Якщо на металевій кулі помістити електричний заряд q , то внаслідок кулонівського відштовхування заряд розподілиться по його поверхні. Потенціал зарядженої кулі:

$$\varphi = k_0 \frac{q}{\varepsilon R} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon R}. \quad (11.27)$$

Експерименти свідчать, що якщо заряд на кулі збільшувати у 2, 3, 4 рази, то потенціал кулі буде збільшуватися у 2, 3, 4, рази і приймати значення 2φ , 3φ , 4φ . Таким чином, відношення заряду на провіднику до потенціалу є величиною постійною для даного тіла, і характеризує здатність накопичувати заряди.

Електроємністю називається скалярна фізична величина, яка чисельно дорівнює заряду, що змінює потенціал провідника на одиницю (1В):

$$C = \frac{q}{\varphi}. \quad (11.28)$$

Одиницею виміру електроємності є фарад (Ф).

Фарад чисельно дорівнює заряду, що змінює потенціал провідника на одиницю (1В).

$$1 \frac{\text{Кл}}{\text{В}} = \text{Ф}.$$

Фарад – велика одиниця електроємності, тому на практиці використовують менші одиниці – мікрофарад, нанофарад і пікофарад:

$$1\text{Ф} = 10^6 \text{ мкФ} = 10^9 \text{ нФ} = 10^{12} \text{ пФ}.$$

З формул (11.27) і (11.28) випливає, що електроємність кулі:

$$C = \frac{q\varepsilon R}{k_0 q} = \frac{\varepsilon R}{k_0} = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R. \quad (11.29)$$

Електроємність провідника не залежить від його маси і матеріалу. Вона залежить від розмірів провідника, діелектричної проникності середовища і наявності інших тіл.

На рис. 11.15,а показаний заряджений електроскоп, на якому закріплена металева куля. На металеву пластину поклали пластину з діелектрика (рис. 11.15,б) – потенціал електроскопу зменшився. Якщо на діелектричну пластину покласти ще й металеву пластину (рис. 11.15,в), то потенціал зменшиться сильніше внаслідок явища

електростатичної індукції. Якщо провідник перебуває далеко від інших тіл, то провідник називається відокремленим.

Електроємність провідника збільшується, якщо провідник оточити діелектриком або поблизу його помістити інші провідники. Збільшення ємності пояснюється явищами електростатичної індукції і поляризації діелектрика. Для накопичування електричного заряду застосовують конденсатори.

Конденсатор являє собою систему провідників, розділених

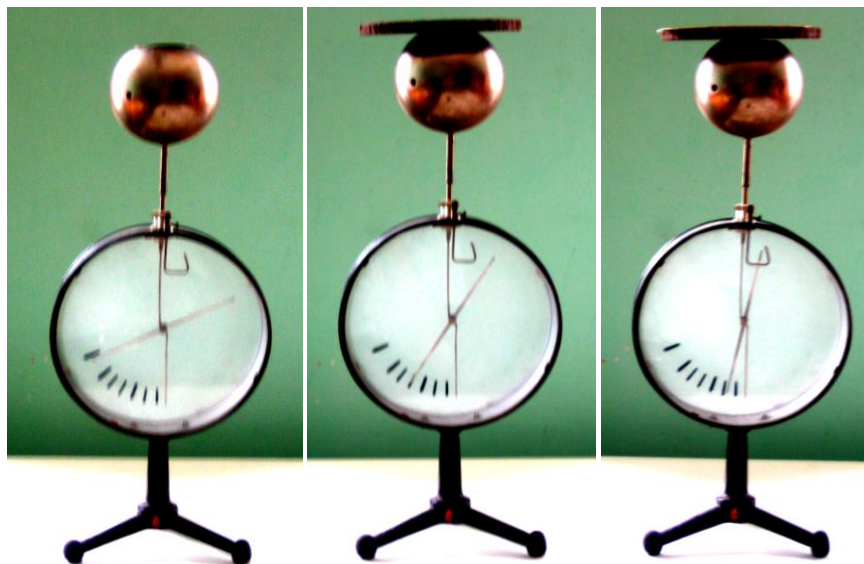


Рис. 11.15

шарами діелектрика. Електроємність будь-якого конденсатора:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}. \quad (11.30)$$

де $\varphi_1 - \varphi_2 = U$ – різниця потенціалів між пластинами (обкладинками) конденсатора.

Залежно від форми провідників розрізняють плоскі і циліндричні конденсатори. Електроємність плоского конденсатора прямо пропорційна площі поверхні пластин, діелектричній проникності діелектрика і обернено пропорційна відстані між пластинами:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}. \quad (11.31)$$

Електроємність циліндричного конденсатора довжиною ℓ дорівнює:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon\ell}{\ln \frac{R_2}{R_1}}, \quad (11.32)$$

де R_1 і R_2 – внутрішній та зовнішній радіуси обкладинок.

Залежно від матеріалу діелектрика бувають повітряні, паперові, керамічні, електролітичні конденсатори.

В електричних колах використовують різні сполуки конденсаторів. Для одержання більшої ємності конденсатори з'єднують паралельно, У цьому випадку напруга на обкладинках конденсаторів однакова. Загальний заряд батареї конденсаторів дорівнює сумі зарядів усіх конденсаторів:

$$q = q_1 + q_2 + \dots \quad (11.33)$$

З формули (11.30) видно, що заряди конденсаторів $q = CU$, $q_1 = C_1U$, $q_2 = C_2U$. Підставивши значення q , q_1 , q_2 у формулу (11.33), одержимо:

$$CU = C_1U + C_2U + \dots \quad (11.34)$$

Скоротивши на U , одержимо формулу ємності батареї конденсаторів. Електроємність батареї паралельно з'єднаних конденсаторів дорівнює сумі електроємностей окремих конденсаторів:

$$C = C_1 + C_2 + \dots \quad (11.35)$$

При послідовній сполуці внаслідок електростатичної індукції заряд на всіх конденсаторах однаковий. Загальне спадання напруги дорівнює сумі падінь напруг на кожному конденсаторі:

$$U = U_1 + U_2 + \dots \quad (11.36)$$

Зі співвідношення $q = CU$, одержимо:

$$\frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \dots \quad (11.37)$$

Скоротивши на q , одержимо формулу ємності батареї при послідовній сполуці конденсаторів:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \quad (11.38)$$

Зворотна електроємність батареї послідовно з'єднаних конденсаторів дорівнює сумі значень зворотних електроємностей

окремих конденсаторів. Заряджений конденсатор має енергію, яку можна обчислити за формулою:

$$W_{ел} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2}. \quad (11.39)$$

Контрольні запитання

1. Що таке електроємність? Запишіть формулу.
2. В яких одиницях вимірюється електроємність?
3. Запишіть формулу електроємності кулі.
4. Що таке конденсатор?
5. Чому дорівнює електроємність плоского конденсатора?
6. Запишіть формулу електроємності при паралельній та послідовній сполуці конденсаторів.

12. ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

12.1. Постійний електричний струм. Джерела струму

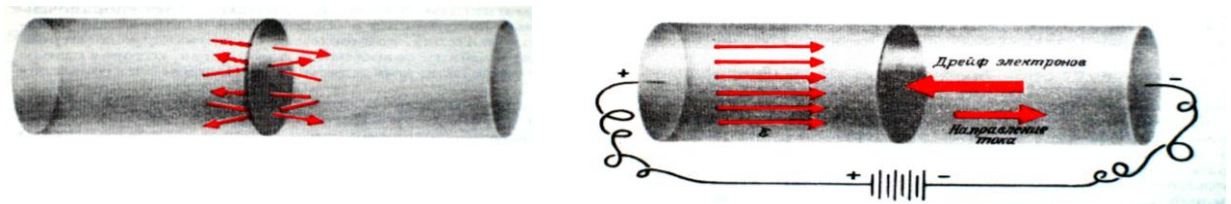


Рис. 12.1

Електричний струм у речовині – це упорядкований рух носіїв електричного заряду. Під час відсутності електричного поля заряди в провіднику рухаються безладно (рис. 12.1).

Якщо заряджене тіло з'єднати провідником із землею, то в провіднику з'явиться електричне поле і вільні заряди будуть рухатися доти, поки різниця потенціалів не буде дорівнювати нулю.

Умовами тривалого існування електричного струму є наявність:

- електричного поля (джерела струму);
- вільних носіїв заряду;
- замкнутого електричного кола.

Електричне коло складається із джерела струму, споживачів, сполучених провідів і вимикача. На рис. 12.2 зображено електричне коло, в якому є акумулятор, лампочка (споживач),

вимикач, прилади для виміру електричного струму (*амперметра*) і

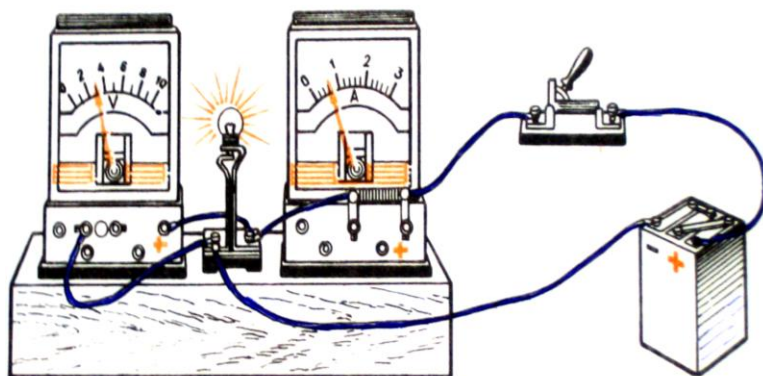


Рис. 12.2

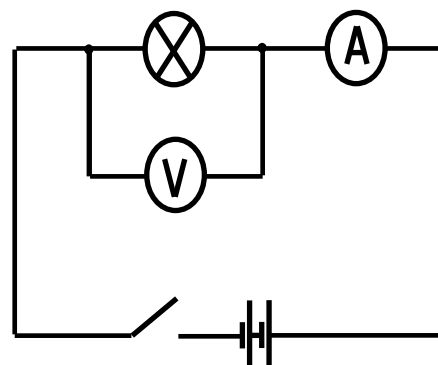


Рис. 12.3

напруги (*вольтметра*). На рис.12.3 це коло зображено у вигляді електричної схеми. Електричне поле в провідниках створюють і підтримують джерела струму (рис. 12.4).

Джерело струму – це пристрій, що розділяє позитивні і негативні заряди за рахунок енергії неелектричного походження (сторонніх сил). Роботу, що виконує джерело струму з поділу зарядів, характеризують електрорушійною силою джерела струму (е.р.с.). Електрорушійна сила джерела струму – фізична величина, що дорівнює роботі сторонніх сил для переміщення одиничного заряду (одиниця заряду в системі СІ – 1 Кл):

$$\varepsilon = \frac{A_{cm}}{q}. \quad (12.1)$$

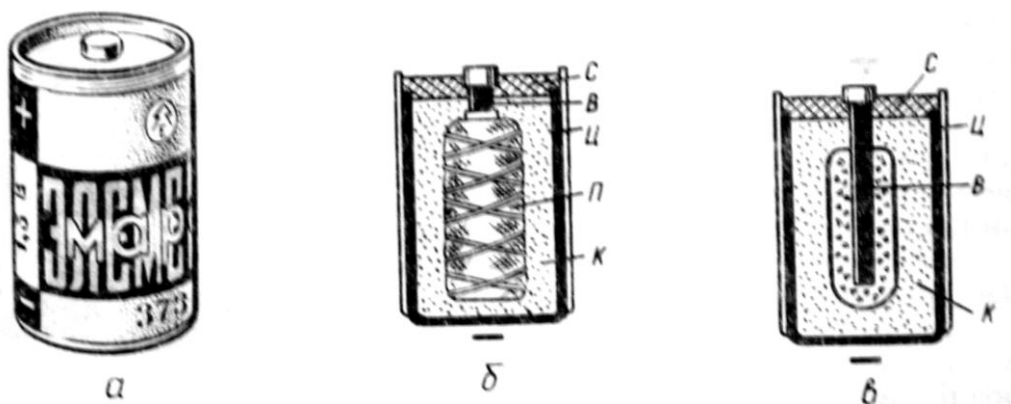


Рис. 12.4

Одиниця виміру е.р.с. – вольт: $\varepsilon = \frac{Дж}{Кл} = В.$. Перше джерело струму – гальванічний елемент було створено італійським ученим Алессандро Вольта (1745-1827). Елемент Вольта складався з цинкових і мідних пластин, які знаходились в електроліті. У гальванічному елементі електричні заряди поділяються на позитивні і негативні за рахунок енергії хімічної реакції.

Сучасний гальванічний елемент (рис.12.4) складається з цинкової посудини, у якій знаходиться вугільний стрижень В. Стрижень поміщений у полотняний мішечок П. Мішечок наповнений сумішшю оксиду марганцю з вугіллям. Замість рідини в елементі використовують густий клейстер К. Клейстер складається з борошна на розчині нашатирного спирту. Цинкова посудина з усім умістом залита шаром смоли С. При взаємодії нашатирного спирту із цинком від цинку відокремлюються позитивні іони і він заряджається негативно, а графітовий електрод заряджається позитивно.

Джерелами струму є акумулятори, електрогенератори, сонячні батареї, гальванічні елементи. Наявність електричного струму у провідниках можна виявити за тепловою, хімічною або магнітною дією.

Контрольні запитання:

1. Що називається електричним струмом?
2. Які умови існування струму ?
3. Що таке джерело струму?
4. Що відбувається в джерелах струму?
5. Що таке ЕРС джерела струму?
6. В яких одиницях вимірюється ЕРС?
7. Як можна виявити електричний струм?
8. З яких елементів складається електричне коло?

12.2. Сила струму. Закон Ома для ділянки кола

Силою струму називається скалярна фізична величина, яка визначається зарядом (кількістю електрики), що проходить через поперечний переріз провідника за 1 секунду:

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (12.2)$$

За одиницю сили струму в СІ прийнятий ампер. Ця одиниця сили струму встановлена на основі взаємодії паралельних провідників зі струмом (рис. 12.5).

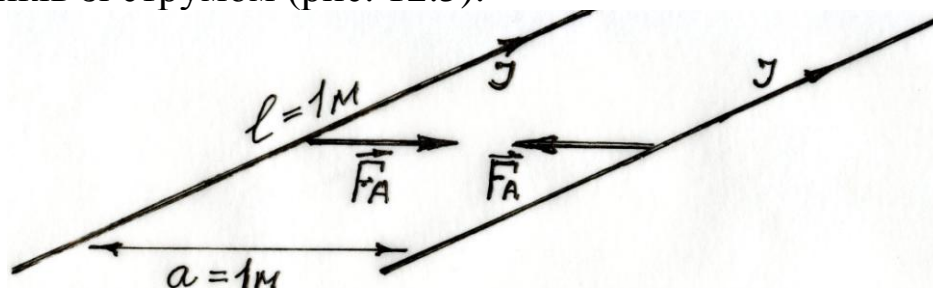


Рис. 12.5

За одиницю сили струму в СІ (1А) приймають струм, при якому відрізки паралельних провідників довжиною $l = 1\text{ м}$, перебуваючи у вакуумі на відстані $a = 1\text{ м}$, взаємодіють із силою $2 \cdot 10^{-7}\text{ Н}$. З формули $q = I \cdot t$ встановлюють одиницю кількості електрики – кулон $1\text{ Кл} = 1\text{ А} \cdot \text{с}$. Якщо потрібно знати розподіл струму по поперечному перерізу провідника, то користуються векторною фізичною величиною, що називається густиною струму \vec{j} . Середня за модулем (по перерізу провідника) густина струму дорівнює відношенню сили струму до площі поперечного перерізу провідника:

$$j = \frac{I}{S} = \frac{dq}{dt \cdot S}; \quad \vec{j} = \frac{I}{S} \vec{n}, \quad (12.3)$$

де \vec{n} – одиничний вектор (орт) нормалі до площі поперечного перерізу провідника.

Густина струму виміряється в $\text{А}/\text{м}^2$. Силу струму вимірюють приладом, що називається амперметром. Амперметр завжди включають в електричне коло послідовно зі споживачем (навантаженням).

Німецький учений Георг Ом (1787–1854) експериментально встановив закон, згідно з яким **сила струму в провіднику прямо пропорційна різниці потенціалів на його кінцях**:

$$I = k \cdot (\varphi_1 - \varphi_2), \quad (12.4)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від властивостей провідника. Досліди свідчать, що при зміні різниці потенціалів на кінцях

провідника відношення різниці потенціалів до сили струму $\frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{I}$ є постійною величиною для кожного провідника. Цей постійний параметр провідника називається електричним опором провідника і позначається буквою R . Закон Ома для однорідної ділянки кола в інтегральній формі записується так:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R}, \quad (12.5)$$

де U – падіння напруги на провіднику.

Опір провідника – це фізична величина, що характеризує здатність провідника перешкоджати проходженню струму. Фізична природа опору пояснюється розсіюванням (зіткненнями) носіїв струму на атомах або іонах провідника.

За одиницю опору приймають опір провідника, у якому, при різниці потенціалів один вольт, сила струму дорівнює одному амперу. Одиниця опору одержала назву Ом: $R = \frac{1V}{1A} = 1Om$.

Експерименти свідчать, що опір провідника прямо пропорційний довжині провідника ℓ , зворотно пропорційний площі поперечного перерізу S і залежить від матеріалу провідника:

$$R = \rho \frac{\ell}{S}, \quad (12.6)$$

де ρ – питомий опір провідника.

З формули (12.6) одержимо одиницю виміру питомого опору:

$$\left[\rho \right] = \frac{Om \cdot m^2}{m} = Om \cdot m.$$

Питомий опір є постійною величиною для даної речовини, тому його значення можна знайти в таблицях.

Підставимо у формулу (12.3) вираз (12.6):

$$j = \frac{I}{S} = \frac{U}{S \cdot R} = \frac{U \cdot S}{S \cdot \rho \cdot \ell} = \frac{E}{\rho}. \quad (12.7)$$

Замінімо питомий опір ρ на питому електропровідність $\sigma = \frac{1}{\rho}$ й отримаємо закон Ома у диференціальній формі:

$$\vec{j} = \frac{\vec{E}}{\rho} = \sigma \vec{E}. \quad (12.8)$$

При значеннях температур, близьких до кімнатної, залежність електричного опору металів від температури – лінійна:

$$R = R_0(1 + \alpha t^{\circ}C), \quad (12.9)$$

де R_0 – опір при $t = 0^{\circ}C$, α – температурний коефіцієнт опору.

За формулою (12.9) знаходимо температурний коефіцієнт опору і його розмірність:

$$\alpha = \frac{R - R_0}{R_0 \cdot t^{\circ}C}; \quad \left[\alpha \right] = \frac{Ом}{Ом \cdot град} = град^{-1}.$$

Електричний опір металів при нагріванні збільшується, а опір розчинів солей, кислот, лугів (електролітів) а також графіту, навпаки, зменшується. Залежність електроопору графіту від температури має вигляд: $R = R_0(1 - \alpha t^{\circ}C)$.

Зі зниженням температури нижче від кімнатної опір металів спочатку різко спадає (питома провідність збільшується), а потім при температурах, близьких до абсолютного нуля, фактично не залежить від температури (рис. 12.6, крива 1). Навпаки, питома провідність діелектриків і напівпровідників мала (а опір великий) і швидко збільшується з підвищенням температури:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right), \quad (12.10)$$

де ΔE – енергія активації електрона (ширина забороненої зони енергій для електрона у напівпровіднику).

У 1916 р. голландський фізик Х. Камерлінг-Оннес, досліджуючи провідність чистої ртуті, виявив, що її опір при температурі рідкого гелію (4,2К) стає рівним нулю (рис. 12.6, крива 2). Явище отримало назву – надпровідності. При проходженні електричного струму через надпровідник у ньому не виділяється теплота. Явище надпровідності було виявлено також у деяких металах і сплавах при температурах, близьких до абсолютного нуля температур. Надпровідник витісняє магнітне поле, тобто є абсолютним діаманетиком, але сильне магнітне поле руйнує надпровідний стан.

Квантова теорія надпровідності була створена лише у 1957 р. Дж. Бардіним, Л. Купером і Дж. Шрифтером (теорія БКШ) і

Н.Н. Боголюбовим. При низькій температурі у надпровідному стані, завдяки взаємодії електронів з кристалічною решіткою,

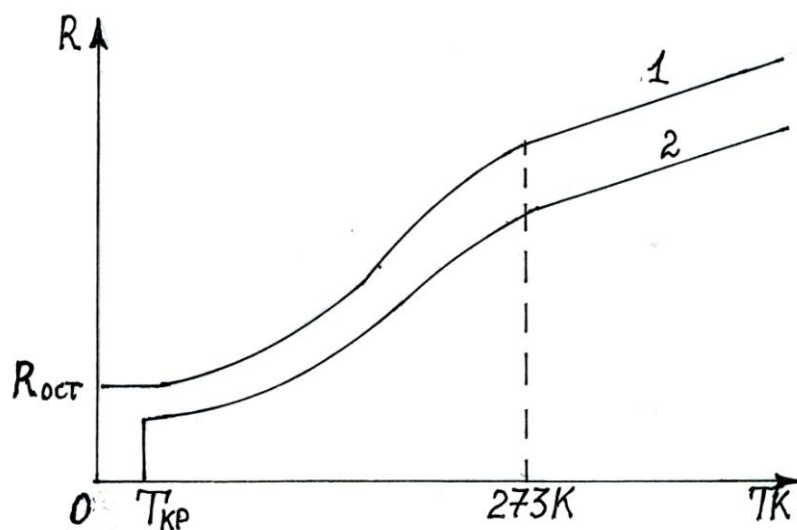


Рис.12.6

утворюються так звані «куперівські пари» електронів, які без опору рухаються в кристалі. Рекордсменом серед надпровідних речовин довго була сполука Nb_3Ge з критичною температурою $T_k = 23,3K$.

У 1986 р. Й. Бернар і К. Мюллер відкрили високо-температурну надпровідність (ВТНП) у керамічній сполуці $Ba-La-Cu-O$ з $T_k = 35K$. Невдовзі була відкрита кераміка $YBa_2Cu_3O_7$ з $T_k = 92K$, яка вище температури рідкого азоту (78K), і ряд керамік з T_k до 200K. За допомогою надпровідників створені магнітометри з чутливістю $10^{-16}Tл$, вольтметри з чутливістю $10^{-18}B$, створені медичинські ЯМР-томографи.

Контрольні запитання

1. Сформулюйте закон Ома і запишіть його формулу.
2. Що таке сила струму?
3. Що таке густина струму?
4. Що таке електричний опір?
5. У яких одиницях вимірюється опір?
6. Як опір залежить від розмірів і форми провідника?
7. Як опір залежить від температури?
8. У яких одиницях вимірюється питомий опір?
9. Від чого залежить питомий опір?

12.3. Сполука провідників і джерел струму

Для регулювання сили струму в електричному колі використовують постійні і змінні резистори які з'єднують як послідовно, так і паралельно. При послідовному з'єднанні (рис. 12.7) сила струму в провідниках на всіх ділянках кола однакова. У разі послідовного з'єднання провідників різниця потенціалів (напруга) у колі дорівнює сумі падінь напруги на окремих ділянках кола:

$$U = U_1 + U_2. \quad (12.11)$$

Із закону Ома для ділянки кола випливає: $U = IR$; $U_1 = IR_1$; $U_2 = IR_2$. Підставивши значення напруги у формулу (12.11) і скоротивши на I , одержимо формулу:

$$R = R_1 + R_2. \quad (12.12)$$

Отже, загальний опір кола дорівнює сумі опорів окремих провідників (споживачів енергії).

При послідовному з'єднанні провідників (резисторів) падіння напруги на окремих провідниках прямо пропорційно опорам провідників:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (12.13)$$

При паралельному з'єднанні провідників (резисторів) падіння напруги на них однакове (рис. 12.8):

$$U_1 = U_2. \quad (12.14)$$

Електричний струм розділяється на паралельні струми:

$$I = I_1 + I_2. \quad (12.15)$$

Якщо виразити струми у формулі (12.15) через опір і падіння напруги, то одержимо:

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}. \quad (12.16)$$

Скоротивши праву і ліву частини рівняння на U , одержимо формулу для загального електричного опору при паралельній сполуці резисторів:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (12.17)$$

Струми в паралельних провідниках обернено пропорційні опорам провідників тому, що (падіння напруги однакові $I_1 R_1 = I_2 R_2$):

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (12.18)$$

Розглянемо ділянку електричного кола, що складається із джерела струму із внутрішнім опором r і резистора з опором R . Нехай

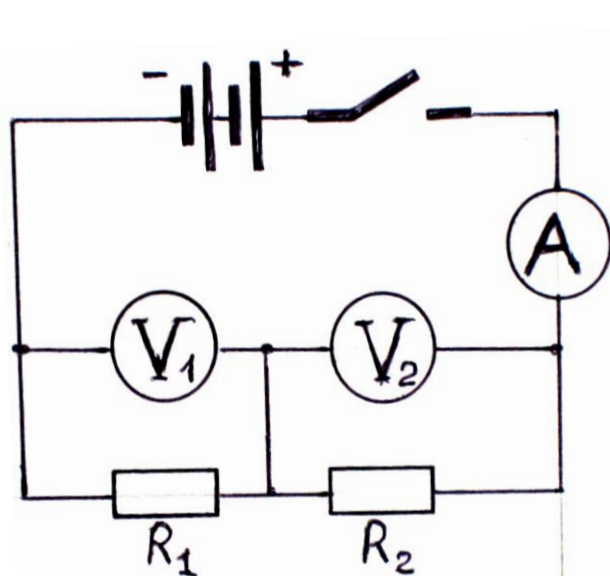


Рис. 12.7

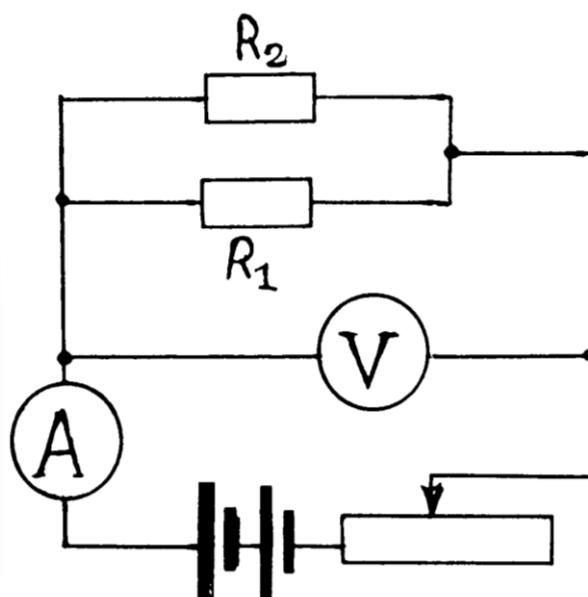


Рис. 12.8

на кінцях провідника підтримується різниця потенціалів ($\varphi_1 - \varphi_2$) зовнішнім джерелом струму (рис. 12.9). За законом Ома для неоднорідної ділянки кола: **сила електричного струму в неоднорідному колі дорівнює сумі (або різниці) електрорушійної сили джерела (е.р.с.) джерела струму і різниці потенціалів поділеної на загальний опір ділянки кола.**

$$I = \frac{\varepsilon \pm (\varphi_1 - \varphi_2)}{R + r} = \frac{U}{R + r}, \quad (12.19)$$

де сума $\varepsilon \pm (\varphi_1 - \varphi_2) = U$ називається напругою (або падінням напруги) на неоднорідній ділянці кола. Вона дорівнює роботі електричного поля і сторонніх сил (джерел струму) на цій ділянці кола.

З'єднаємо провідником точки В і С електричного кола, показаного на рис. 12.9. Таке коло показано на рис. 12.10. Різниця потенціалів між точками В і С ($\varphi_1 - \varphi_2$) = 0.

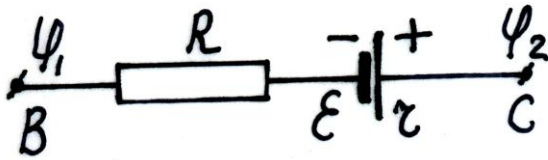


Рис. 12.9

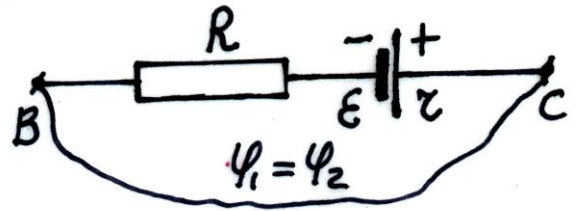


Рис. 12.10

Закон Ома для повного (замкненого) кола в математичній формі:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (12.20)$$

Сформулюємо закон Ома для повного електричного кола: **електричний струм прямо пропорційний електрорушійній силі джерела струму і обернено пропорційний електричному опорі всього кола.**

Джерела струму з'єднують між собою послідовно і паралельно. При послідовній сполуці е.р.с. батареї дорівнює сумі е.р.с. усіх джерел, а внутрішній опір батареї дорівнює сумі опорів усіх джерел струму.

Якщо n однакових джерел струму з'єднати послідовно (рис.12.11), то е.р.с. батареї $n\mathcal{E}$, внутрішній опір nr . Відповідно до закону Ома сила струму для цього кола із зовнішнім опором R :

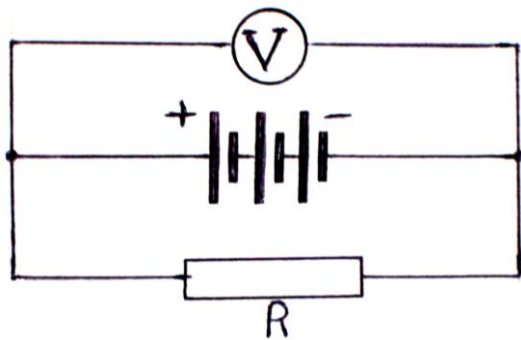


Рис. 12.11

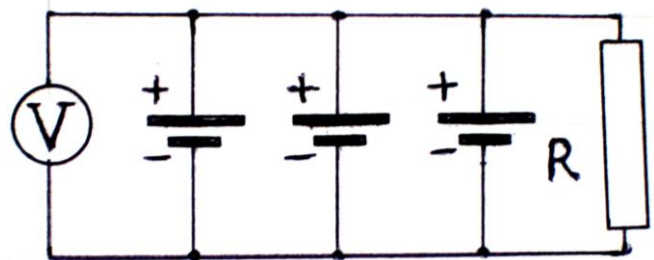


Рис. 12.12

$$I = \frac{n\mathcal{E}}{R + nr}. \quad (12.21)$$

При паралельній сполуці n однакових джерел струму ЕРС батареї дорівнює е.р.с. одного елемента, а внутрішній опір зменшується в n разів (рис. 12.12). Силу струму в колі із зовнішнім опором R обчислюємо за формулою:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r/n}. \quad (12.22)$$

Контрольні запитання

1. Чому при послідовній сполуці провідників сила струму однакова на всіх ділянках електричного кола?
2. Чому дорівнює загальна напруга при послідовній сполуці провідників?
3. Чому дорівнює загальний опір кола при послідовній сполуці провідників?
4. Як залежить падіння напруги на ділянках кола від опору при послідовній сполуці провідників?
5. Чому дорівнює сила струму у всьому колі при паралельній сполуці провідників?
6. Як падає напруга на всіх ділянках кола при паралельній сполуці провідників?
7. Як залежить струм у ділянках кола від опору ділянок при паралельній сполуці провідників?
8. Сформулюйте закон Ома для неоднорідної ділянки кола і запишіть формулу.
9. Сформулюйте закон Ома для повного кола і запишіть формулу закону.

12.4. Розгалужені кола. Правила Кірхгофа

Для розрахунку розгалужених електричних кіл, які складаються з багатьох контурів, користуються правилами, сформульованими німецьким фізиком Г. Кірхгофом (1824 – 1887).

Перше правило Кірхгофа є наслідком закону збереження заряду: **алгебраїчна сума струмів, що сходяться в вузлі, дорівнює нулю:**

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0. \quad (12.23)$$

Вузол – це місце кола, де сходяться більше ніж двох провідників.

Друге правило Кірхгофа є наслідком закону збереження енергії: **у простому замкненому контурі розгалуженого кола**

алгебраїчна сума спадів напруг на окремих ділянках контура дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил, увімкнених у цей контур:

$$\sum_{k=1}^m I_k R_k = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i, \quad (12.24)$$

де k – кількість ділянок контуру; i – кількість джерел е.р.с.

Розв'язок електричних кіл за правилами Кірхгофа проводять за такою схемою: поділяють коло на прості кола – контури; у кожному контурі задають величини струмів (I_1, I_2, I_3, \dots); довільно вибирають напрями струмів і напрями обходу контурів; складають $n - 1$ рівняння за першим законом Кірхгофа і $m - 1$ рівняння за другим законом Кірхгофа. Якщо n – кількість вузлів, а p – кількість контурів, то кількість незалежних рівнянь за другим законом Кірхгофа становить $p - n + 1$. Якщо напрям струму на ділянці збігається з напрямом обходу контуру, то спад напруги береться додатним і навпаки. Якщо в результаті розв'язування системи рівнянь одержані від'ємні значення сили струму, чи опору, то це означає, що струм проходить у протилежному напрямі.

12.5. Робота і потужність постійного струму

У будь-якому електричному колі енергія електричного струму перетворюється в еквівалентну кількість іншого виду енергії (внутрішню енергію провідників, електромагнітну і т.д.). Мірою перетворення електричної енергії є робота з переміщення електричних зарядів. Робота з переміщення заряду в електричному полі дорівнює добутку заряду на різницю потенціалів:

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (12.25)$$

Виразивши заряд через силу струму й час, одержимо:

$$A = IUt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t. \quad (12.26)$$

Повна робота, що робить джерело струму із внутрішнім опором r :

$$A_{\text{нов}} = q \cdot \varepsilon = I \varepsilon t = I^2 (R + r) t, \quad (12.27)$$

де ε – е.р.с. джерела струму.

При проходженні електричного струму по провіднику

впорядкований рух заряджених часток порушується. Енергія струму перетворюється у внутрішню, тобто теплову енергію. На початку 40-х рр. XIX століття Дж. Джоуль і Е. Ленц незалежно один від одного експериментально встановили закон, за яким можна розрахувати кількість теплоти Q , що виділяється в провіднику при проходженні електричного струму. Сформулюємо закон Джоуля-Ленца: *кількість теплоти, що виділяється в електричному колі, прямо пропорційна квадрату сили струму, опору ділянки кола і часу проходження струму:*

$$Q = I^2 R t. \quad (12.28)$$

Корисна робота, що виконує джерело струму на деякому елементі кола (12.13) визначається формулою $A = IUt$. Якщо розділити корисну роботу на роботу джерела струму, одержимо коефіцієнт корисної дії джерела струму:

$$\eta = \frac{A}{A_{нов}} = \frac{IUt}{I\epsilon t} = \frac{U}{\epsilon} = \frac{IR}{I(R+r)} = \frac{R}{R+r}. \quad (12.29)$$

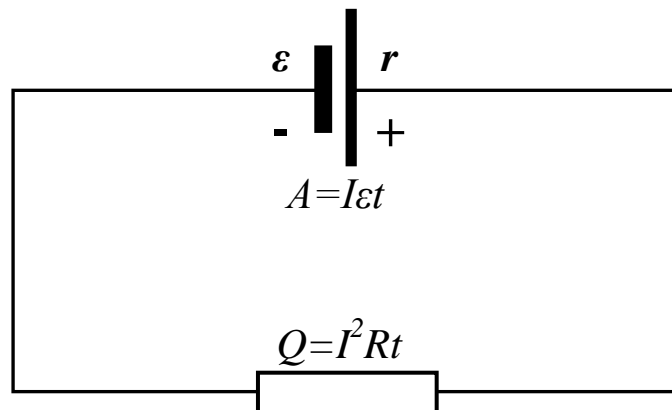


Рис. 12.13

З формули (12.27) видно, що η тим більше, чим менше внутрішній опір джерела струму. При короткому замиканні $\eta = 0$.

Потужність постійного електричного струму визначається роботою, що виконується за одиницю часу:

$$N = \frac{IUt}{t} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad (12.30)$$

Одиницею потужності в СІ є ват. 1 Вт – це робота в 1 Дж , що виконується за 1 с . На практиці і у побуті широко застосовуються несистемні одиниці: $1 \text{ Вт} \cdot \text{с} = 3600 \text{ Дж}$, $1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \text{ МДж}$.

12.6. Електронна теорія провідності металів

Носіями електричного струму в металах є електрони. Валентні електрони металу стають вільними і хаотично рухаються в усьому об'ємі кристалічної решітки, у вузлах якої розміщуються іони. Згідно з класичною теорією П.Друде (1863-1906) і Х.Лоренца (1853-1928), у першому наближенні електрони підкоряються законам ідеального газу. Електричне поле надає електронам впорядкованого руху, який накладається на тепловий рух. Густина струму:

$$j = ne\langle v \rangle, \quad (12.31)$$

де n – концентрація носіїв; $\langle v \rangle$ – середня арифметична швидкість впорядкованого руху; e – заряд електрона.

За класичною теорією Друде і Лоренца середня швидкість:

$$\langle v \rangle = \frac{e\langle \lambda \rangle}{2m\langle u \rangle} E, \quad (12.32)$$

де $\langle \lambda \rangle$ – середня довжина вільного пробігу електронів; $\langle u \rangle$ – середня швидкість хаотичного руху електронів; E – напруженість електричного поля.

Остаточно отримаємо закон Ома в диференціальній формі:

$$j = ne \cdot \frac{e\langle \lambda \rangle}{2m\langle u \rangle} E = \sigma E. \quad (12.33)$$

Густина струму в металевому провіднику пропорційна напруженості електричного поля, як вимагає закон Ома.

За допомогою класичної теорії можна отримати формулу закону Джоуля-Ленца. У 1853 році німецькі фізики Відеман і Франц експериментально встановили, що відношення питомої теплопровідності до питомої електропровідності для всіх металів при однаковій температурі є стала величина:

$$\frac{k}{\gamma} = C \cdot T. \quad (12.34)$$

Класична теорія якісно пояснила це співвідношення, але величина коефіцієнта C виявилася меншою від експериментально визначеної. Водночас виявилось, що класична теорія не змогла

пояснити температурну залежність електричного опору. У межах кімнатних температур $R \sim T$, а з теорії випливає, що $R \sim \sqrt{T}$. Недоліки у теорії електропровідності металів пододала квантова теорія провідності металів.

12.7. Робота виходу електронів з металу

Згідно з класичною теорією металів електрони вільно рухаються в кристалічній решітці. Якщо електрони виходять з металу, то в цих місцях виникає надлишковий позитивний заряд і електрони притягуються назад. Поблизу поверхні виникає подвійний електричний шар. Щоб покинути метал, електрони повинні виконати роботу виходу (рис.12.14):

$$A = e \cdot \Delta\varphi, \quad (12.35)$$

де $\Delta\varphi$ – поверхневий скачок потенціалу.

Потенціальна енергія електрона в металі (за модулем) набагато більша за кінетичну енергію, тому $W^{nom} - W^{kin} = -e \cdot \Delta\varphi$.

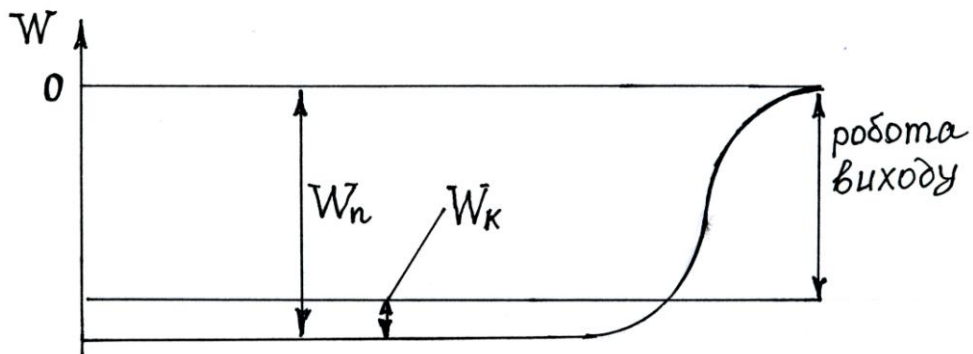


Рис.12.14

Якщо привести у тісний контакт два різних метали або напівпровідники з різним типом провідності, то між ними виникає контактна різниця потенціалів. Згідно із законом Вольта **контактна різниця потенціалів двох металів залежить тільки від їх хімічного складу і температури**. Вольта виявив ряд металів, в якому кожний попередній метал при контакті з наступним матиме додатний потенціал:

Al, Zn, Sn, Cd, Pb, Sb, Bi, Hg, Fe, Cu, Ag, Au, Pt, Pd.

Контактна різниця потенціалів, що виникає за рахунок різної роботи виходу:

$$\Delta\varphi_1 = -\frac{A_1 - A_2}{e}. \quad (12.36)$$

На контактну різницю потенціалів впливає також різниця концентрацій електронного газу, тому повна контактна різниця потенціалів:

$$\Delta\varphi = -\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}. \quad (12.37)$$

Якщо скласти замкнене коло з двох провідників (рис.12.15) і підтримувати їх контакти при різних температурах, то між ними виникає різниця потенціалів:

$$\varepsilon = \Delta\varphi = \frac{kT_1}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} + \frac{kT_2}{e} \ln \frac{n_2}{n_1} = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} T_1 - T_2, \quad (12.38)$$

де n_1 і n_2 – концентрації носіїв у провідниках.

Таким чином, у замкненому колі, утвореному з різнорідних металевих провідників, виникає термо-е.р.с., яка прямо пропорційна різниці температур спаїв:

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T, \quad (12.39)$$

де α – коефіцієнт термо-е.р.с.

Явище термоелектрики використовується в термопарах для вимірювання температур в інтервалі від 4К до 2500К (рис.12.16).

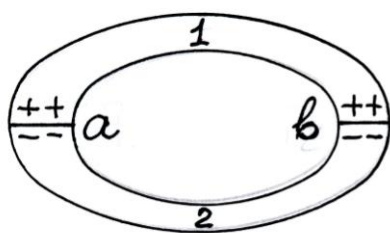


Рис.12.15

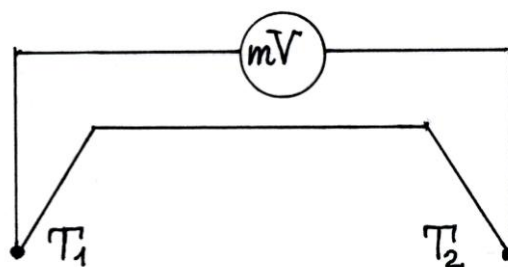


Рис.12.16

12.8. Явище термоелектронної емісії

Термоелектронною емісією називається явище вилітання електронів з поверхні твердих тіл при підвищеній температурі. Явище термоелектронної емісії пояснюється тим, що при досить високій температурі вільні електрони можуть перебороти потенціальний бар'єр сил електричного притягання на границі

метал – вакуум. Робота виходу залежить від металу, з якого вилітають електрони, від обробки його поверхні.

Явище термоелектронної емісії лежить в основі роботи таких електровакуумних приладів, як вакуумний діод, тріод, електронно-променева трубка та ін.

Вакуумний діод являє собою металевий або скляний балон, з якого відкачано повітря, усередині якого є два електроди – анод *A* і катод *K*, що нагрівається струмом (рис. 12.17). Катод виготовляють у формі тонкої прямої нитки або тонкого циліндра, усередині якого міститься нитка розжарення катода, а анод має форму циліндра (рис.12.18). Діод застосовується для випрямлення змінного струму, тому що він пропускає струм одного напрямку – від анода до катода (має однобічну провідність).

Вакуумний тріод – лампа, у балоні якої розміщується три електроди – катод, сітка й анод (рис.12.18). Третій (керуючий) електрод – сітка має вигляд спіралі, що оточує катод. Якщо на сітку

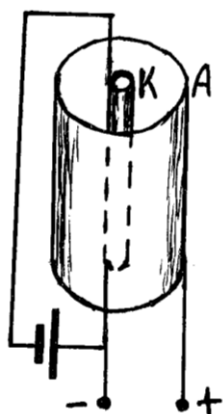


Рис. 12.17

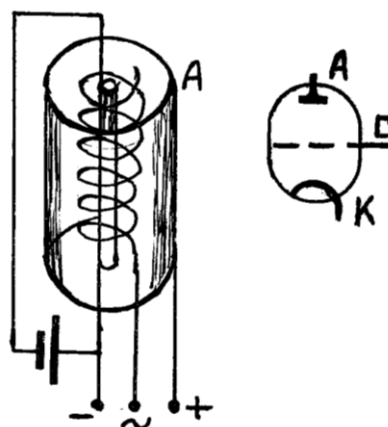


Рис. 12.18

подавати невеликий позитивний потенціал – анодний струм підсилюється. При подачі негативного потенціалу лампа «закривається» – струм не йде. У разі подаючи на сітку невеликої змінної напруги можна одержати значні зміни анодного струму. Для більшого підсилення змінного струму в балоні поміщають три сітки. Такі лампи називаються пентодами.

У сучасній електротехніці замість вакуумних застосовуються напівпровідникові діоди і тріоди (транзистори). Як матеріали для виготовлення сучасних напівпровідникових приладів застосовують монокристали германію, кремнію і деяких сполук, які легують

миш'яком і індієм. У сучасних напівпровідникових приладах на монокристалічні пластинки розмірами 10x10 мм поміщають сотні і навіть тисячі діодів і тріодів. Такі пристрої називаються мікросхемами або чипами. Напівпровідникові прилади мають такі переваги перед електронними лампами:

- *малі розміри і масу;*
- *як малі так і великі потужності;*
- *великий строк роботи;*
- *досить високу механічну міцність.*

До недоліків напівпровідникових приладів варто віднести наявність «зворотного» струму, сильний вплив підвищених температур і радіоактивних випромінювань.

Контрольні запитання

1. У чому полягає явище термоелектронної емісії?
2. Що таке робота виходу електрона з металу?
3. Від чого залежить робота виходу електронів з металу?
4. Що являє собою вакуумний діод?
5. Для чого використовують діод?
6. Що являє собою тріод? Для чого використовують тріод?
7. Намалюйте схеми діода й тріода.

12.9. Електричний струм в електролітах і газах

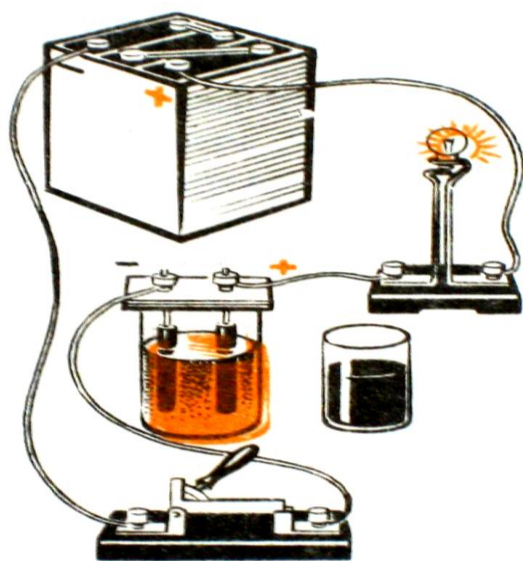


Рис. 12.19

Електролітами називаються розчини і розплави солей, кислот та лугів. Молекули солей, кислот і лугів у водяних розчинах дисоціюють на іони. Явище електролітичної дисоціації відбувається внаслідок зменшення електростатичної взаємодії між іонами (діелектрична проникність води $\epsilon = 81$) і зіткнень молекул. Іони протилежного знака можуть рекомбінувати (поєднуватися) відтворюючи нейтральні молекули. Між процесами електро-

літичної дисоціації і рекомбінації при постійній температурі встановлюється динамічна рівновага.

Якщо в електроліт занурити два електроди і приєднати їх до джерела струму (рис. 12.19), то позитивно заряджені іони водню і металів будуть рухатися до катода, а негативні іони – до анода. Віддаючи заряд електродам іони виділяються на них у вигляді нейтральних атомів.

Явище виділення речовини на електродах під час проходження електричного струму через електроліт називається електролізом. Електричний струм в електролітах являє собою впорядкований рух іонів.

Пропускаючи електричний струм через різні електроліти і вимірюючи масу речовини, що виділилася на електродах, англійський учений Майкл Фарадей установив закони електролізу.

Перший закон Фарадея

• **Маса речовини, що виділилася на електродах, прямо пропорційна заряду, що пройшов через електроліт:**

$$m = kq = kIt, \quad (12.40)$$

де k – електрохімічний еквівалент даної речовини (значення k наведені в таблицях). Електрохімічний еквівалент чисельно дорівнює масі речовини, що виділяється на електроді під час проходження через електроліт одного кулона електричного заряду.

Другий закон Фарадея

• **Електрохімічні еквіваленти речовини прямо пропорційний їхнім кілограм-еквівалентам:**

$$k = \frac{1}{F} x, \quad (12.41)$$

де $x = \frac{A}{n}$ – кілограм-еквівалент (хімічний еквівалент) дорівнює відношенню атомної маси (у кілограмах) до валентності; F – кількість електрики, яка необхідна для виділення одного кілограм-еквівалента будь-якої речовини, називається числом Фарадея:

$$F = 9,65 \cdot 10^4 \frac{Кл}{кг \cdot екв}. \quad (12.42)$$

Число Фарадея – загальний заряд усіх іонів в одному кілограм-еквіваленті речовини. Через число Фарадея і число

Авогадро визначається заряд одновалентного іона, тобто мінімальний електричний заряд:

$$e = \frac{F}{N_A} = \frac{9,65 \cdot 10^4}{6,023 \cdot 10^{23}} = 1,601 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Об'єднаний закон електролізу

Поєднуючи перший і другий закони Фарадея, можна одержати загальний закон електролізу:

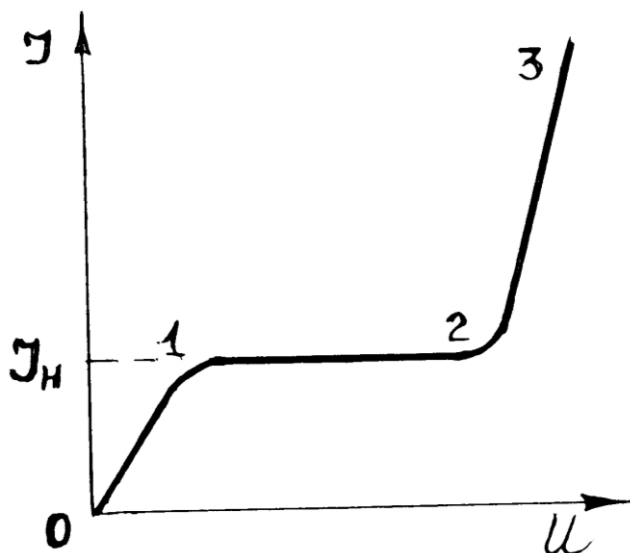
$$m = \frac{1}{F} \cdot q = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n} \cdot I \cdot t = kIt. \quad (12.43)$$

У нормальних умовах газу є гарними діелектриками. Для того, щоб газ проводив електричний струм його необхідно іонізувати. Іонізувати газ можна за допомогою:

- високої температури;
- ультрафіолетового, рентгенівського випромінювання;
- радіоактивного, лазерного випромінювання.

Процес іонізації полягає у вириванні електронів з атомів, у результаті якого утворюються позитивно заряджені іони й електрони. При взаємодії електронів з нейтральними атомами можуть утворюватися негативні іони. Позитивні іони можуть з'єднуватися з електронами, утворюючи нейтральні атоми. Цей процес називається **рекомбінацією**. Під дією іонізатора в об'ємі газу встановлюється рухлива рівновага між процесами іонізації і рекомбінації.

При підвищенні різниці потенціалів між обкладинками повітряного конденсатора струм спочатку росте (рис.12.20),



досягаючи насичення. Існування струму насичення I_n пояснюється тим, що всі іони, які виникають при дії іонізатора, беруть участь у переносі електричного струму. Збільшити струм насичення можна, шляхом збільшення інтенсивності іонізатора. На рис. 12.20 ділянка 0-1 відповідає області, де приблизно виконується закон Ома.

Рис. 12.20

Ділянка 1-2 – це область насичення струму. При подальшому збільшенні різниці потенціалів (ділянка 2-3) відбувається ударна іонізація атомів прискореними електронами. Такий розряд називається *самостійним*. Він триває навіть після припинення дії іонізатора.

Контрольні запитання

1. Напишіть формулу роботи постійного електричного струму.
2. Напишіть формулу роботи джерела струму.
3. Чому дорівнює коефіцієнт корисної дії джерела струму?
4. Напишіть формулу потужності постійного електричного струму.
5. Що таке коротке замикання?
6. Чому провідник нагрівається під час проходження через нього електричного струму?
7. Сформулюйте закон Джоуля-Ленца. Напишіть його формулу.
9. Що називається електролізом?
10. Що називається електролітичною дисоціацією?
11. Що називається рекомбінацією?
12. Що являє собою електричний струм в електролітах?
13. Сформулюйте перший закон Фарадея. Напишіть його формулу.
14. Сформулюйте другий закон Фарадея. Напишіть його формулу.
15. Чому дорівнює число Фарадея?
16. Напишіть формулу об'єднаного закону Фарадея.
17. Що являє собою електричний струм у газах?
18. Що називається газовим розрядом? Які газові розряди ви знаєте?

13. МАГНІТНЕ ПОЛЕ

13.1. Взаємодія провідників зі струмом

Магнітні явища були відомі людству багато століть тому. У природі існує залізна руда – магнетит, що має властивість притягати до себе дрібні сталеві предмети. Шматки такої руди є природними постійними магнітами. Якщо постійний магніт у вигляді легкого тонкого стрижня підвісити на нитці, то він установиться так, що один його кінець буде спрямований на північ, а другий на південь.

Кінець магніту, спрямований на північ, називають *північним*

полюсом (N), а протилежний – *південним полюсом* (S). Досліди показують, що однойменні полюси – відштовхуються, різнойменні притягуються. У XVIII ст. електрика і магнетизм вважалися схожими явищами, але такими, що все-таки мають різну природу.

Зв'язок між електричними та магнітними явищами вперше виявив датський фізик Х.К. Ерстед у 1820 р. Якщо над провідником зі струмом, спрямованим уздовж земного меридіана, помістити магнітну стрілку, то стрілка повернеться і встановиться під кутом до напрямку струму (рис.13.1).

Якщо по двох плоских паралельних проводах пропустити постійний струм в одному напрямку, то провідники притягаються. У разі пропущення струму в протилежних напрямках провідники відштовхуються (рис.13.2). Кількість позитивних і негативних

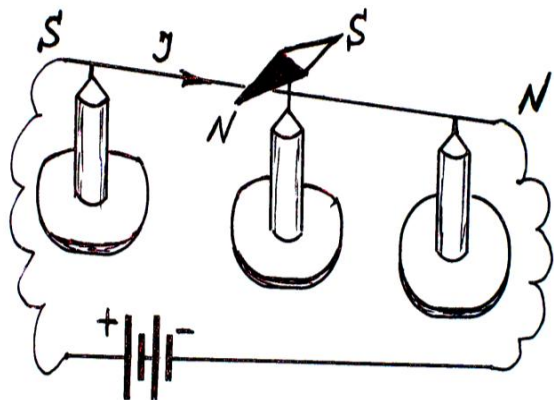


Рис. 13.1

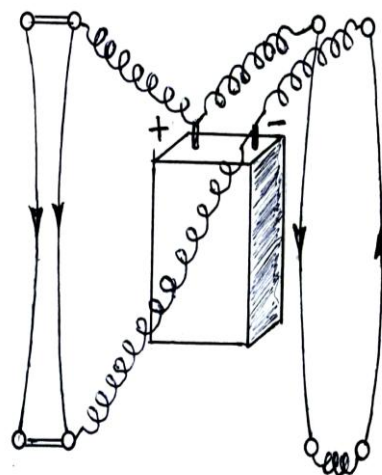


Рис. 13.2

зарядів у провіднику однакова, тому взаємодія провідників зі струмом не є електростатичною. Очевидно, що магнітне поле генерують заряди, які рухаються.

13.2. Магнітне поле струму

Навколо провідника зі струмом (навколо електричних зарядів, що рухаються) виникає особливий стан простору, що назвали магнітним полем. Магнітне поле матеріальне, тому що воно має такі властивості:

- *створюється зарядами, що рухаються, або струмами;*
- *діє на струми й електричні заряди, що рухаються;*

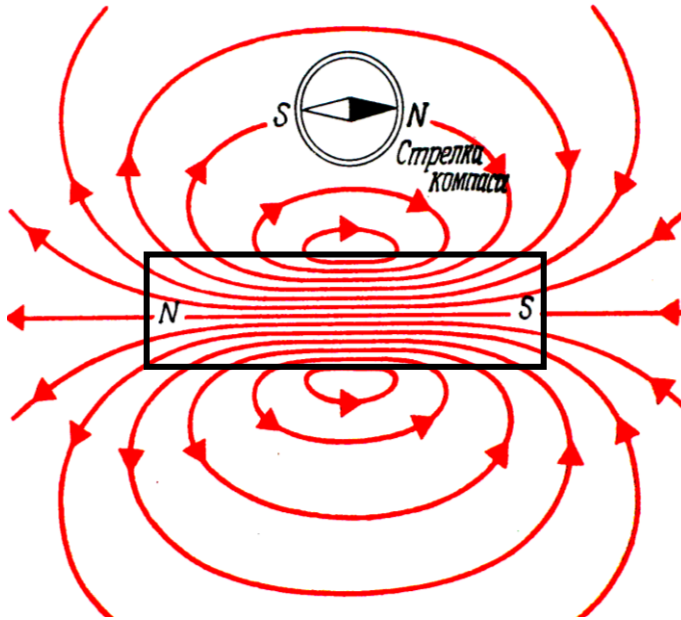


Рис. 13.3

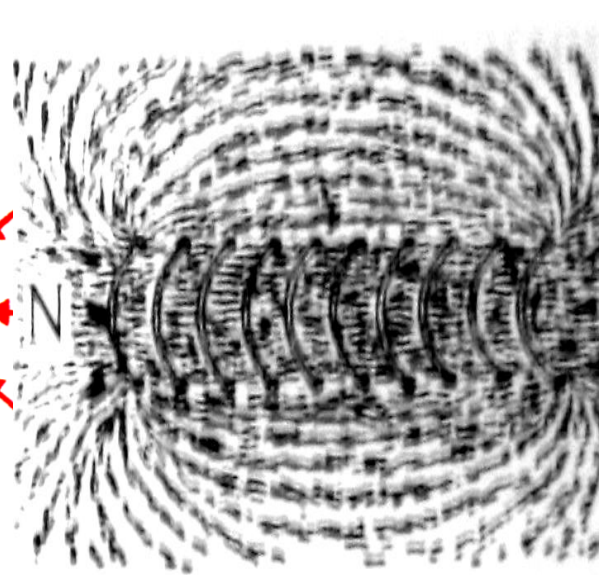


Рис. 13.4

- *виявляється за допомогою провідника зі струмом.*

Наочно (графічно) магнітне поле описують за допомогою силових ліній.

Силова лінія магнітного поля – це лінія, напрямком дотичної до якої в кожній точці збігається із силою, що діє на північний полюс магнітної стрілки.

Зображення силових ліній провідників зі струмом різної форми можна моделювати за допомогою залізних обпилювань. На рис. 13.3 – 13.4 видно, що, всередині соленоїда силові лінії магнітного поля паралельні. Таке поле називається однорідним.

Силові лінії магнітного поля завжди замкнені, тому що магнітних зарядів, на відміну від електричних, у природі не існує.

Напрямок силових ліній магнітних полів визначають за допомогою правила буравчика (правого гвинта). У випадку прямолінійного провідника напрямком силових ліній збігається з напрямком обертання рукоятки свердлика, якщо його поступальний рух збігається з напрямком струму (рис.13.5,а).

У разі колового струму (рис.13.5,б) і соленоїда (рис.13.5,в) напрямком силових ліній магнітного поля збігається з напрямком поступального руху буравчика, якщо обертання рукоятки свердлика збігається з напрямком колового струму. Магнітне поле прямого постійного магніту і соленоїда дуже схожі.

У природі не існує однополюсних магнітів. Магнітне поле, на відміну від потенційного електростатичного поля, є вихровим (соленоїдальним).

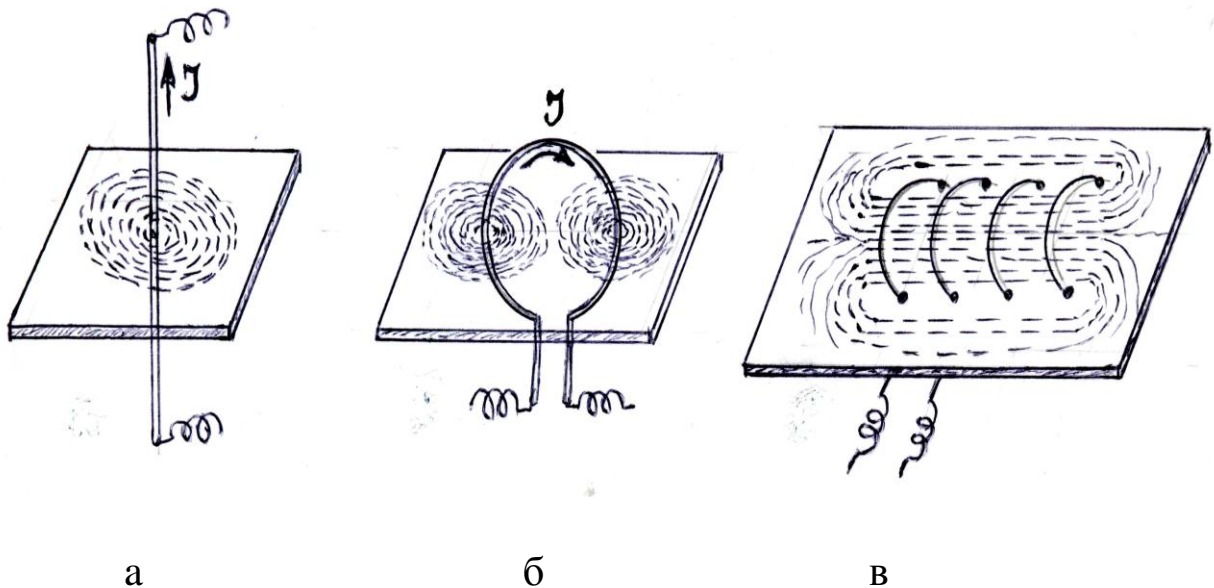


Рис.13.5

13.3. Сила Ампера. Вектор магнітної індукції

На провідник зі струмом, поміщений у магнітне поле, діє сила, що одержала назву сили Ампера. Експерименти свідчать, що сила Ампера прямо пропорційна силі струму, довжині провідника $d\ell$, інтенсивності магнітного поля і синусу кута між напрямком струму і напрямком магнітного поля (рис.13.6):

$$dF_A = Id\ell B \sin \alpha. \quad (13.1)$$

Напрямок сили Ампера визначають за допомогою правила лівої руки (рис. 13.7): *якщо ліву руку розташувати так, щоб силові лінії магнітного поля входили в долоню перпендикулярно, а чотири витягнутих пальці вказували напрямком струму, тоді відігнутий на 90° великий палець покаже напрямок сили, що діє на провідник зі струмом.*

У векторному вигляді формула закону має вигляд:

$$d\vec{F}_A = Id\ell B \sin \alpha \cdot \vec{n} = I [d\vec{\ell} \times \vec{B}]. \quad (13.2)$$

Напрямок сили Ампера можна визначити за правилом свердлика: *якщо обертати рукоятку свердлика від напрямку струму до напрямку магнітного поля, то поступальний рух свердлика покаже напрямок сили Ампера.*

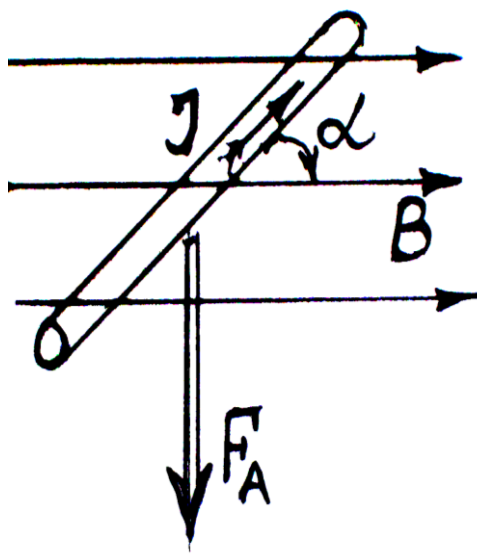


Рис. 13.6

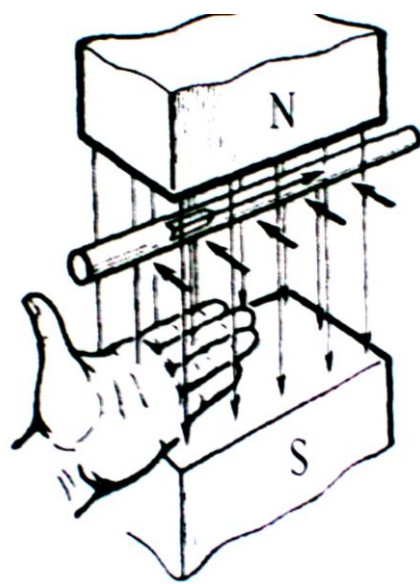


Рис. 13.7

Силову характеристику магнітного поля (магнітну індукцію) можна встановити із закону Ампера, якщо прийняти кут $\alpha = 90^\circ$. У цьому разі відношення сили Ампера до довжини провідника і сили струму є постійна величина для заданої області простору

$$\frac{dF_A}{Idl} = const. \quad (13.3)$$

Таким чином, *модуль магнітної індукції чисельно дорівнює силі, з якої магнітне поле діє на прямолінійний провідник довжиною $l = 1 \text{ м}$ зі струмом $I = 1 \text{ А}$, який поміщено перпендикулярно до силових ліній магнітного поля:*

$$B = \frac{dF_A}{Idl \sin 90^\circ}. \quad (13.4)$$

За одиницю магнітної індукції в СІ приймають індукцію магнітного поля, що діє на кожний метр провідника зі струмом 1 А, що розташований перпендикулярно до поля, із силою 1 Н. Одиниця магнітної індукції називається тесла (Тл):

$$1\text{Тл} = \frac{1\text{Н}}{1\text{А} \cdot 1\text{м}} = 1 \frac{\text{Нм}}{\text{Ам}} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Ам}} = 1 \frac{\text{АВс}}{\text{А} \cdot \text{м}^2} = 1 \frac{\text{Вс}}{\text{м}^2}.$$

13.4. Рамка зі струмом у магнітному полі

На провідник у вигляді квадратної рамки (рис. 13.8,а) зі стороною ℓ , розміщений у магнітному полі, діє сила Ампера. Сила

Ампера прагне повернути рамку так, щоб перпендикуляр (нормаль) до її поверхні був орієнтований уздовж напрямку магнітного поля (рис. 13.8,в). Для характеристики рамки зі струмом вводять фізичну величину, що має назву *магнітний момент кільцевого струму* $\vec{p}_m = IS\vec{n}$, де I – сила струму, S – площа контуру. Напрямок вектора магнітного моменту визначають за допомогою правила свердлика. Момент пари сил, які обертають рамку, дорівнює подвоєному добутку сили Ампера на плече сили:

$$M = 2F_A \frac{d}{2} \sin \alpha = F_A d \sin \alpha. \quad (13.5)$$

Підставивши у формулу (13.10) силу Ампера, одержимо для моменту пари сил вираз:

$$M = I\ell B d \sin \alpha = p_m B \sin \alpha. \quad (13.6)$$

З формули (13.6) можна встановити силову характеристику магнітного поля B : *модуль вектора магнітної індукції дорівнює відношенню максимального оберտального механічного моменту ($\alpha = 0$) до магнітного моменту:*

$$B = \frac{M_{max}}{I \cdot S} = \frac{M_{max}}{p_m}. \quad (13.7)$$

За напрямок вектора магнітної індукції приймається напрямок позитивної нормалі до контуру зі струмом який вільно встановився у магнітному полі (рис. 13.8,в).

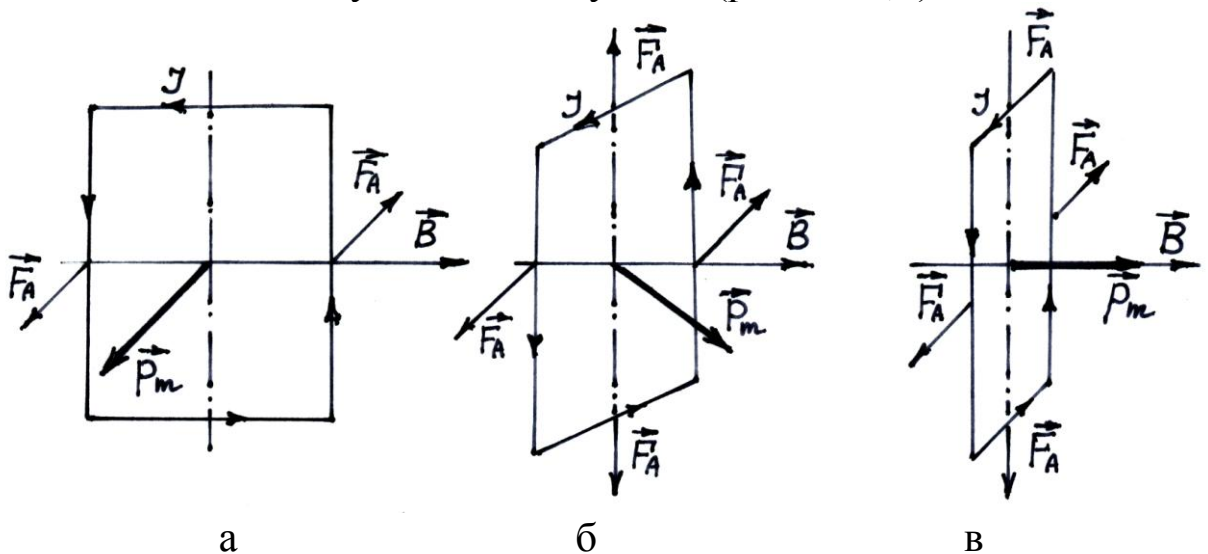


Рис. 13.8

13.5. Закон Біо-Савара- Лапласа

У 1920 р. французькі вчені Ш. Біо (1774 – 1862) та Ф. Савар (1791 – 1841) експериментально довели, що індукція магнітного поля, створеного струмом, пропорційна силі струму, залежить від розмірів, форми провідника та відстані від точки спостереження до провідника. Узагальнюючи їх експериментальні результати, П. Лаплас (1749 – 1827), отримав вираз для індукції магнітного поля малого прямого елемента провідника довжиною $d\ell$ (рис.13.9 – 13.10):

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0 I [d\vec{\ell}, \vec{r}]}{4\pi \cdot r^3}, \quad (13.8)$$

де \vec{r} – радіус-вектор, проведений від елемента $d\ell$ в задану точку; I – сила струму; μ – магнітна проникність середовища.

Напрямок $d\vec{B}$ перпендикулярний до площини, в якій лежать вектори $d\vec{\ell}$, \vec{r} , визначається за відомим правилом свердлика і збігається з дотичною до силової лінії магнітної індукції.

Для модуля вектора $d\vec{B}$ із формули (13.8) дістанемо:

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I d\ell \sin \alpha}{r^2}, \quad (13.9)$$

де α – кут між вектором $d\ell$ і \vec{r} .

Повну індукцію магнітного поля знайдемо інтегруванням по всій довжині провідника:

$$\vec{B} = \int d\vec{B}. \quad (13.10)$$

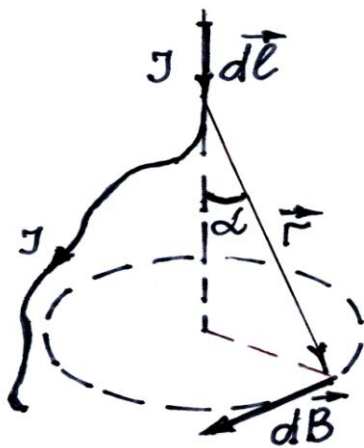


Рис. 13.9

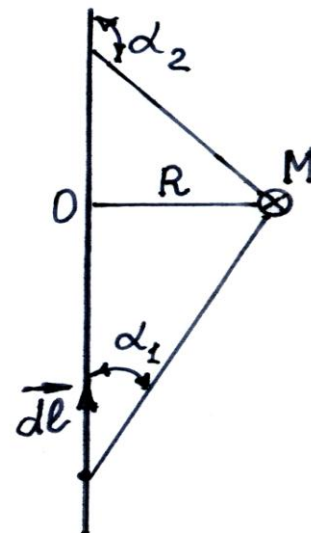


Рис.13.10

Закон Біо-Савара-Лапласа використовують для розрахунку магнітних полів, утворених струмами різноманітної орієнтації. Розглянемо результат розрахунків магнітних полів різної конфігурації.

Магнітна індукція поля лінійного провідника кінцевої довжини:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi R} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2); \quad (13.11)$$

Магнітна індукція і напруженість поля прямого лінійного провідника дуже великої (нескінченної) довжини (рис. 13.11):

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi R}; \quad H = \frac{I}{2\pi R}. \quad (13.12)$$

Магнітна індукція і напруженість поля в центрі колового струму:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2R}; \quad H = \frac{I}{2R}. \quad (13.13)$$

Циркуляція вектора напруженості електричного поля по замкненому контуру ℓ дорівнює нулю $\oint_{\ell} \vec{E} d\vec{\ell} = 0$, що свідчить про потенціальний характер електростатичного поля. Аналогічно знайдемо циркуляцію вектора індукції магнітного поля:

$$\oint_{\ell} \vec{B} d\vec{\ell} = \oint_{\ell} B dl \cos\alpha, \quad (13.14)$$

де α – кут між вектором \vec{B} і $d\vec{\ell}$.

Використаємо замкнену колову лінію індукції магнітного поля лінійного провідника зі струмом. Оскільки лінії індукції магнітного поля дотичні до будь-якого елемента контуру, то кут між \vec{B} і $d\vec{\ell}$ дорівнює нулю (рис.13.11). Підставивши формулу (13.13) у (13.14) дістанемо:

$$\oint_{\ell} \vec{B} d\vec{\ell} = \oint_{\ell} \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi R} dl = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi R} \oint_{\ell} dl. \quad (13.15)$$

Після інтегрування по всій довжині $\ell = 2\pi R$ отримаємо:

$$\oint_{\ell} \vec{B} d\vec{\ell} = \mu\mu_0 I. \quad (13.16)$$

Якщо магнітне поле створене багатьма струмами, то циркуляція індукції магнітного поля дорівнює:

$$\oint_{\ell} \vec{B} d\vec{\ell} = \mu\mu_0 \sum_{i=1}^n I_i. \quad (13.17)$$

Отже, циркуляція індукції магнітного поля дорівнює сумі струмів, які охоплює контур. Це означає, що магнітне поле не потенціальне, а вихрове. Отриманий вираз виражає закон повного струму.

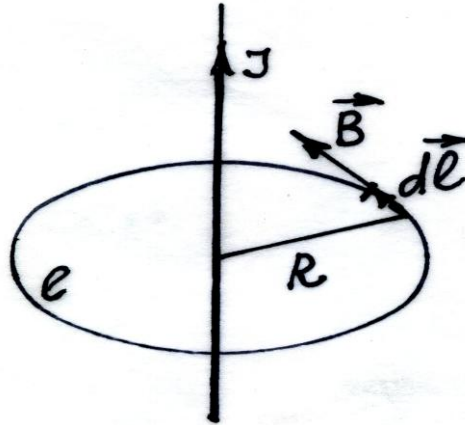


Рис.13.11

За допомогою закону повного струму визначимо магнітне поле соленоїда (рис.13.12). За замкнену лінію виберемо контур 1234 і знайдемо вклад кожної зі сторін:

$$\oint_{\ell} \vec{B} d\vec{\ell} = \int_1^2 \vec{B} d\vec{\ell} + \int_2^3 \vec{B} d\vec{\ell} + \int_3^4 \vec{B} d\vec{\ell} + \int_4^1 \vec{B} d\vec{\ell}. \quad (13.18)$$

За межами соленоїда магнітне поле практично відсутнє (3-4), а напрям вектора \vec{B} перпендикулярний до відрізків 2-3, 4-1, тому ці ділянки не вносять суттєвого вкладу в магнітне поле соленоїда:

$$\oint_{\ell} \vec{B} d\vec{\ell} = \int_1^2 \vec{B} d\vec{\ell} = B \int_1^2 d\ell = Bl. \quad (13.19)$$



Рис.13.12

Враховуючи, що соленоїд містить N витків, крізь які проходить струм I , і закон повного струму, отримуємо:

$$B\ell = \mu\mu_0NI; \quad B = \mu\mu_0 \frac{N}{\ell} I = \mu\mu_0 nI. \quad (13.20)$$

Контрольні запитання

1. Чи діє магнітне поле на заряди, які рухаються?
2. Як графічно зображують магнітні поля?
3. Сформулюйте правило свердлика для прямого провідника зі струмом?
4. Для чого застосовується правило свердлика?
5. Сформулюйте правило свердлика для кругового провідника зі струмом і соленоїда?
6. Чим відрізняється магнітне поле від електростатичного (потенціального)?
7. Напишіть формулу закону Ампера.
8. Що називається вектором магнітної індукції? Напишіть одиницю виміру цієї величини в СІ.
9. Сформулюйте правило лівої руки.

13.6. Магнітний потік. Поле у речовині. Сила Лоренца

Силкові лінії магнітного поля проводять так, щоб через одиничну площину, перпендикулярну вектору магнітної індукції, проходила така кількість силових ліній, яка пропорційна модулю магнітної індукції. Кількість силових ліній, які проходять через елементарну площину dS під кутом α до нормалі (потік вектора магнітної індукції) (рис.13.13), можна знайти за формулою:

$$dN = d\Phi_B = BdS \cos \alpha. \quad (13.21)$$

Кількість силових ліній, які проходять через будь-яку площину S , можна отримати за формулою:

$$N = \Phi_B = \int_S BdS \cos \alpha. \quad (13.22)$$

За одиницю магнітного потоку в СІ-вебер приймають потік магнітного поля з індукцією 1 Тл, що пронизує площину $S = 1 \text{ м}^2$ нормально ($\alpha = 0$) до цієї площини:

$$1B = 1Tл \cdot 1M^2 = 1 \frac{Bc}{M^2} \cdot 1M^2 = 1Bc.$$

На кожний заряд, що рухається в магнітному полі, діє сила, що одержала назву сили Лоренца. Прийнемо, що всі носії заряду у провіднику рухаються з однаковою (дрейфовою) швидкістю.

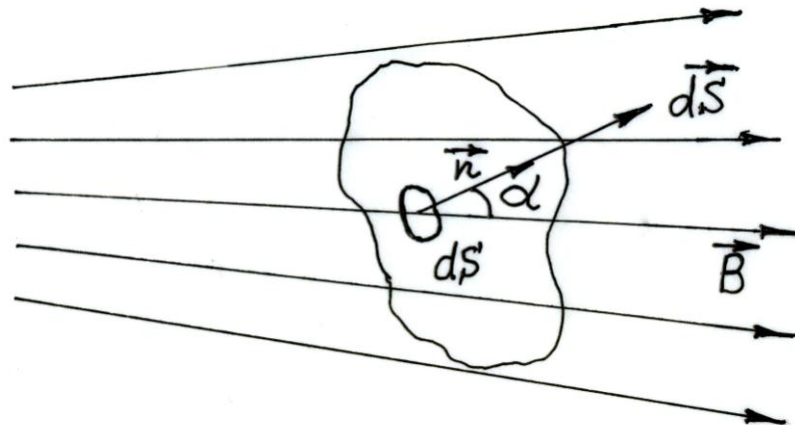


Рис. 13.13

Використовуючи закон Ампера, знайдемо силу Лоренца:

$$F_{л} = \frac{F_A}{N} = \frac{I\ell B \sin \alpha}{N}, \quad (13.23)$$

де $I = qn\nu S$ – сила струму; n – концентрація зарядів; $N = nV = nS\ell$ – число зарядів в об'ємі V . Підставивши значення I і N у формулу (13.23), одержимо силу Лоренца:

$$F_{л} = \frac{q\nu nS\ell B \sin \alpha}{nS\ell} = q\nu B \sin \alpha. \quad (13.24)$$

У векторному вигляді сила Лоренца:

$$\vec{F}_{л} = q [\vec{v} \times \vec{B}]. \quad (13.25)$$

Напрямок сили Лоренца визначають за правилом лівої руки (див, рис. 13.7) або правилом свердлика. Сила Лоренца завжди спрямована перпендикулярно до швидкості і змушує заряджену частинку рухатися по колу. Знайдемо радіус цього кола, враховуючи те що сила Лоренца відіграє роль нормальної (доцентрової) сили:

$$m \frac{v^2}{R} = q\nu B \sin 90^0; \quad R = \frac{m\nu}{qB}. \quad (13.26)$$

Якщо кут $\alpha = 90^0$ – заряджена частка рухається по колу, якщо

$\alpha < 90^\circ$ – частинка рухається по спіралі. Період обертання зарядженої частинки в магнітному полі дорівнює:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB}. \quad (13.27)$$

З формули (13.27) видно, що період обертання частинок не залежить від радіуса, величини і напрямку швидкості. Ця обставина дозволила створити циклотрон – прилад для прискорення заряджених часток.

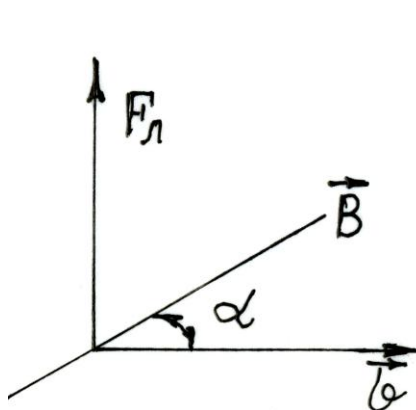


Рис.13.14

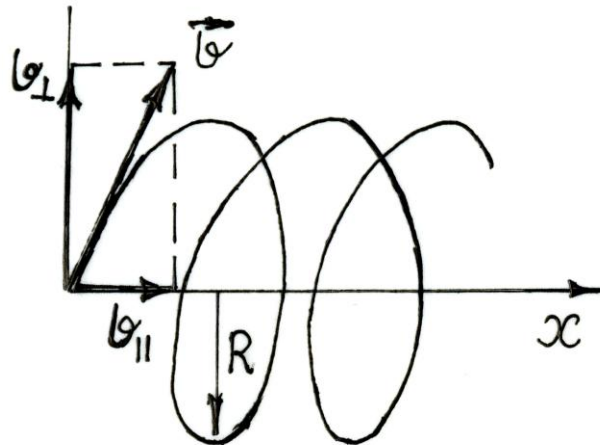


Рис.13.15

Магнітне поле речовини дуже залежить від властивостей навколишнього середовища. Якщо в котушку зі струмом (соленоїд) помістити залізо, кобальт або нікель, то магнітне поле значно зростає. Будь-яка речовина у магнітному полі намагнічується, що пов'язано з рухом електронів.

Магнітне поле у вакуумі, тобто створене струмами провідності й незалежне від магнітних властивостей речовини, характеризується вектором напруженості магнітного поля \vec{H} і вимірюється в амперах на метр. Зв'язок між векторами \vec{B} та \vec{H} описується формулою:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (13.28)$$

де μ_0 – магнітна стала; μ – відносна магнітна проникність середовища.

Відносна магнітна проникність середовища показує, у скільки разів магнітне поле у речовині більше або менше від магнітного поля у вакуумі $\mu = B/(\mu_0 H)$.

Електрони, що обертаються навколо ядер атомів, створюють елементарні магнітні поля, які взаємодіють із зовнішнім магнітним

полем. Унаслідок цієї взаємодії магнітне поле у речовині або збільшується, або зменшується.

У першому наближенні електрони в атомах рухаються по колових орбітах, утворюючи коловий струм:

$$i = e\nu = \frac{e\nu}{2\pi r}, \quad (13.29)$$

де ν – частота обертання електрона; ν – його швидкість; r – радіус орбіти.

Орбітальному руху електрона відповідає орбітальний магнітний момент, який визначається (за модулем) величиною:

$$p_m = iS = \frac{e\nu}{2\pi r} \pi r^2 = \frac{1}{2} e\nu r, \quad (13.29)$$

де S – площа орбіти.

Електрон, обертаючись по колу, володіє орбітальним механічним моментом імпульсу, який спрямований протилежно магнітному моменту (рис.13.16). За модулем орбітальний момент імпульсу дорівнює:

$$L_\ell = r m_e \nu. \quad (13.30)$$

Відношення цих моментів отримало назву гіромагнітного відношення:

$$\frac{p_m}{L_\ell} = \frac{e}{2m_e}. \quad (13.31)$$

Крім орбітального, електрон має також власний (спіновий) магнітний момент \vec{p}_s та спіновий момент імпульсу \vec{L}_s . Сумарний магнітний момент атома визначається векторною сумою орбітальних і спінових магнітних моментів:

$$\vec{p}_a = \sum \vec{p}_m + \sum \vec{p}_s. \quad (13.32)$$

У зовнішньому магнітному полі магнітні моменти прецесують навколо напрямку цього поля (рис.13.16), що приводить до появи додаткового магнітного поля, яке напрямлене назустріч зовнішньому полю. Цей так званий діамагнітний ефект приводить до послаблення зовнішнього магнітного поля. Він проявляється у тому випадку, коли сумарний магнітний момент атома дорівнює нулю.

Якщо сумарний магнітний момент атома більший від нуля (рис.13.17), то магнітне поле у речовині збільшується.

Для характеристики магнітного моменту одиниці об'єму

«магнетика» вводять векторну величину – **намагніченість**:

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum \vec{p}_a, \quad (13.33)$$

де ΔV – фізично малий об'єм; $\sum \vec{p}_a$ – результативний магнітний момент атомів у цьому об'ємі.

Магнітне поле у речовині складається з поля струму і внутрішнього магнітного поля, яке виникає в речовині і характеризується вектором намагніченості:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu \vec{J}. \quad (13.34)$$

Експерименти показали, що в не дуже сильних полях намагніченість прямо пропорційна напруженості поля:

$$\vec{J} = k \vec{H}, \quad (13.35)$$

де коефіцієнт k – магнітна сприйнятливність, що характеризує здатність будь-якої речовини намагнічуватися.

Таким чином, зв'язок між вектором магнітної індукції і вектором напруженості визначається за формулою:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 k \vec{H} = \mu_0 (1 + k) \vec{H} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (13.36)$$

де μ – магнітна проникність речовини.

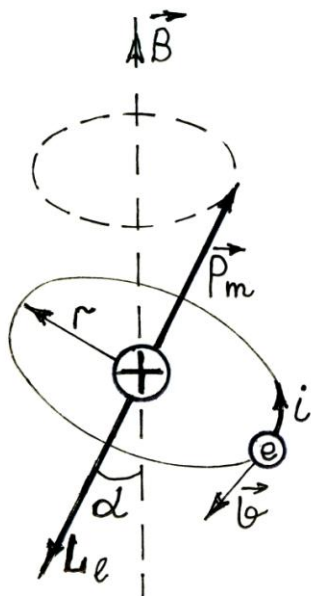


Рис. 13.16

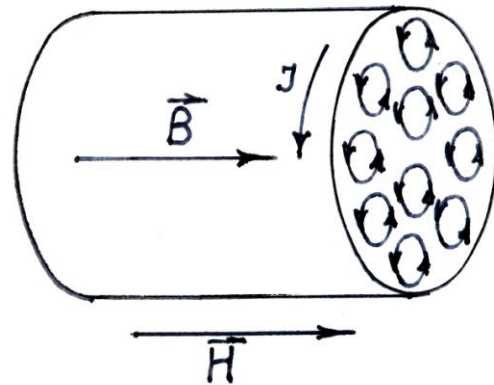


Рис. 13.17

Всі речовини прийнято ділити на три основні групи:

1. Діамагнетики ($\mu < 1$) – речовини, у яких магнітне поле дещо послаблюється. Це вода ($\mu = 0,999987$), мідь ($\mu = 0,999988$), золото, скло, інертні гази.

2. Парамагнетики ($\mu > 1$) – речовини, у яких магнітне поле дещо підсилюється. Це алюміній ($\mu = 1,000084$), кисень ($\mu = 1,003449$), цезій ($\mu = 1,000029$), платина.

3. Феромагнетики ($\mu \gg 1$) – речовини, у яких магнітне поле підсилюється в десятки і сотні разів. Це залізо, кобальт, нікель, перехідні метали, ферити.

На рис. 13.18 наведені криві намагнічування діамагнетиків (залежність 1), парамагнетиків (залежність 2) та феромагнетиків (залежність 3), показано зовнішнє магнітне поле соленоїда – H (угорі зліва), магнітне поле у зразку – B . На рис. 13.18 також наведена залежність магнітної проникності речовини μ від напруженості поля.

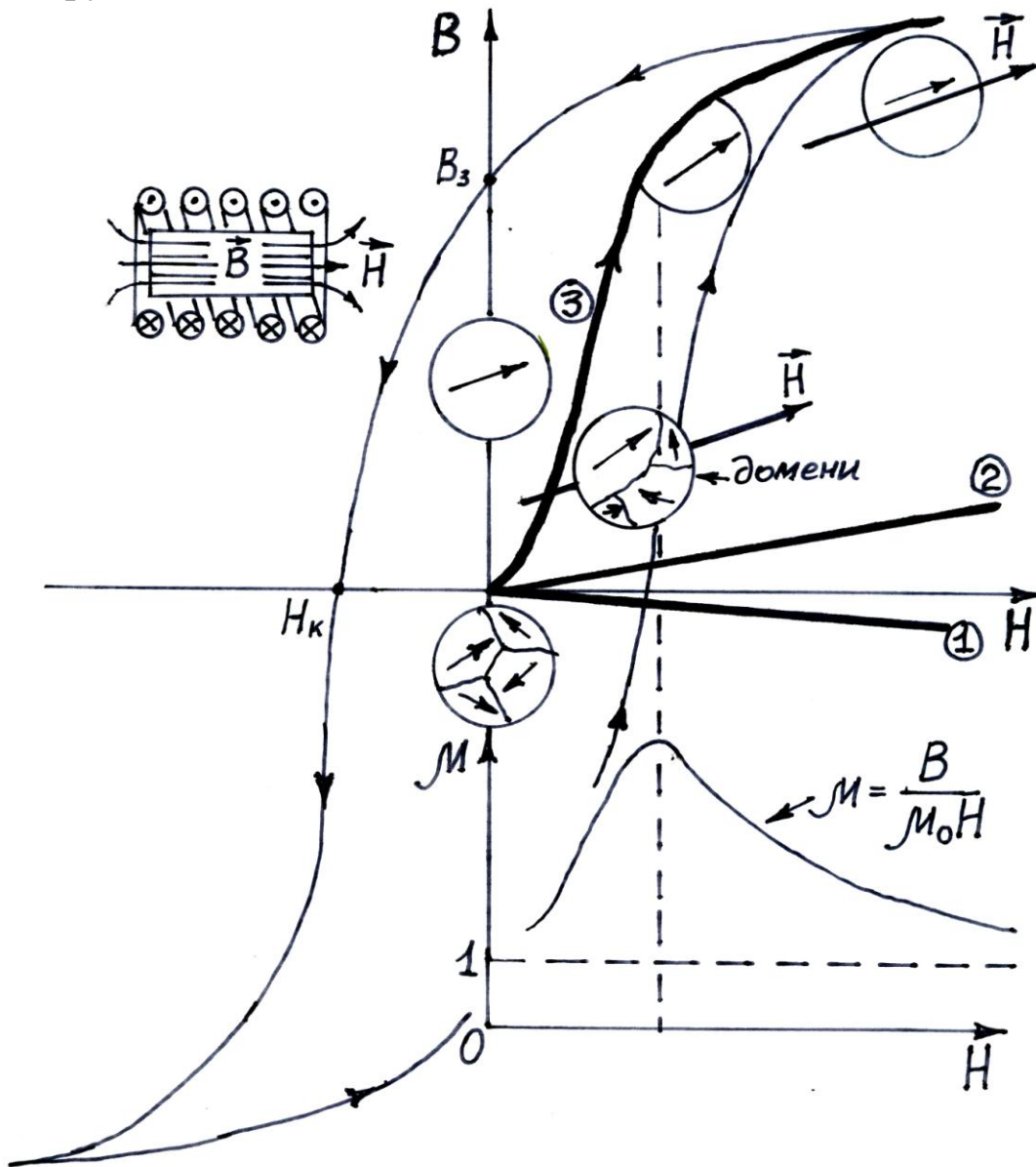


Рис.13.18

Так, у феромагнетиків у разі відсутності магнітного поля завжди є невеликі області самовільного (спонтанного) намагнічування – домени, у яких власні (спінові) магнітні моменти зорієнтовані в одному напрямку. Вони подібні до маленьких постійних магнітів, які розташовані хаотично. При збільшенні зовнішнього магнітного поля \vec{H} феромагнітні домени, які орієнтовані уздовж поля, зростають за рахунок сусідніх і поле у феромагнетику зростає. Ця залежність має максимум, наявність якого обумовлена тим, що подальше зростання феромагнітних доменів, які орієнтовані уздовж поля, неможливе. При подальшому зростанні зовнішнього магнітного поля феромагнітні домени починають повертатися у напрямку зовнішнього поля та підсилюють його, але далі настає насичення. Під час циклічного намагнічування виникає явище магнітного гістерезису (див. рис.13.18). Під час розмагнічування ($H=0$) у феромагнетику спостерігається залишкова індукція B_s . Щоб повністю розмагнітити феромагнетик, потрібно прикласти магнітне поле протилежного знаку $-H_k$. Залишкова намагніченість зменшується з підвищенням температури і зникає при критичній температурі (точки Кюрі).

За шириною петлі гістерезису феромагнетики поділяють на магнітно-м'які та магнітно-тверді. Перші використовуються у колах змінного струму, а другі – для виготовлення постійних магнітів.

13.7. Магнітне поле біологічних об'єктів

Усі рослини і тварини перебувають під дією магнітного поля Землі. Магнітне поле біля поверхні Землі становить $\approx 1 \cdot 10^{-7}$ Тл, а на границі магнітосфери $5 \cdot 10^{-5}$ Тл. За формою воно нагадує поле диполя, центр якого зміщений відносно центра Землі, а вісь нахилена до осі обертання Землі на $11,5^\circ$.

За сучасною гіпотезою в рідкому ядрі відбувається турбулентне конвективне перемішування електропровідної речовини, яке призводить до самозбудження геомагнітного поля.

Геомагнітне поле та його зміни впливають на живих організмів та рослини. Воно може справляти орієнтувальну дію під час міграцій птахів і риб, переміщення комах, молюсків та інших

тварин. Для орієнтації стосовно магнітного поля Землі використовуються мікроскопічні монокристали заліза або магнетиту (Fe_3O_4). Так зміна напрямку польоту птаха стосовно силових ліній геомагнітного поля деформує тканини, що оточують магнетик, і по нервовій системі передається у головний мозок птаха. Акули і скати володіють рецепторами, які розташовані в їх боковій лінії. У процесі руху в геомагнітному полі Землі між протилежними кінцями тіла риби генерується електрорушійна сила індукції. Акули здатні фіксувати напрям магнітного поля, рухаючись зі швидкістю всього 0,01 м/с.

Взаємодія магнітних полів, які генеруються органами людського організму (серце, мозок), з геомагнітним полем у період магнітних буревіїв збільшує кількість серцево-судинних захворювань, погіршується стан хворих на гіпертонію.

Магнітні поля з індукцією 0,01-0,1 Тл здійснюють гальмівний вплив на нервову систему людини, пригнічують рефлексі, спостерігається розширення судин, крововиливи, змінюються властивості тромбоцитів, швидкість осідання еритроцитів. Тривала дія магнітних полів спричиняє підвищення вмісту в крові гемоглобуліну, зменшення числа лейкоцитів і деяких ферментів.

Магнітні поля впливають і на рослинний світ. Деякі рослини (пшениця, овес, цукровий буряк) орієнтують кореневу систему або стебло стосовно магнітного поля, тобто рослинам властивий *магніотропізм*. Корінь кукурудзи згинається у процесі проростання в напрямі південного магнітного полюса.

Під впливом зміни магнітного поля змінюється швидкість росту мікроорганізмів, синтез РНК, активність їх ферментних систем. Частково ці ефекти можна пояснити зміною проникності біологічних мембран, зміною властивостей в організмі водних розчинів.

Оскільки магнітне поле впливає на регуляторні системи організму, то воно може бути важливим інструментом для управління деякими біологічними процесами.

Контрольні запитання

1. Що називають магнітним потоком? Напишіть формулу.
2. У яких одиницях вимірюється магнітний потік у СІ?
3. Які речовини належать до феромагнетиків?

4. Які речовини належать до діамагнетиків?
5. Більша або менша від одиниці магнітна проникність діамагнетиків?
6. Які речовини належать до парамагнетиків?
7. Більша або менша від одиниці магнітна проникність парамагнетиків?
8. Чому дорівнює числове значення μ_0 ?
9. Що називають силою Лоренца? Напишіть формулу сили Лоренца.
10. Сформулюйте правило лівої руки.

14. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ

14.1. Явище електромагнітної індукції

У 1820 р. Ерстед виявив, що електричний струм породжує магнітне поле. Помістивши над провідником, спрямованим уздовж земного меридіана, магнітну стрілку і пропустивши по провіднику електричний струм, він побачив, що стрілка відхиляється (рис.14.1). Розмірковуючи над відкриттям Ерстеда, Майкл Фарадей дійшов такого висновку: якщо *«електрика створює магнетизм»*, то й *«магнетизм повинен створювати електрику»*. Довгий час Фарадея переслідували невдачі, і, нарешті, в 1831 р. він виявив явище електромагнітної індукції, намотавши під час досліду дві котушки на один залізний стрижень. Якщо в одній котушці виникав або пропадав електричний струм у результаті підключення до неї або відключення від неї гальванічної батареї, то в іншій котушці виникав короткочасний струм. Цей струм виявлявся за допомогою гальванометра, що був приєднаний до другої котушки.

Фарадей також виявив індукційний струм у котушці, коли до неї наближали чи від неї віддаляли іншу котушку, по якій протікав електричний струм, або коли до неї наближали чи від неї віддаляли магніт (рис. 14.2).

Відкриття Фарадея привернуло увагу багатьох фізиків. Необхідно було встановити загальний закон електромагнітної індукції. Потрібно було з'ясувати, як і від чого залежить сила індукційного струму у провіднику, та і визначити електрорушійну силу індукції. Це завдання було вирішено Фарадеєм і Максвеллом пізніше.

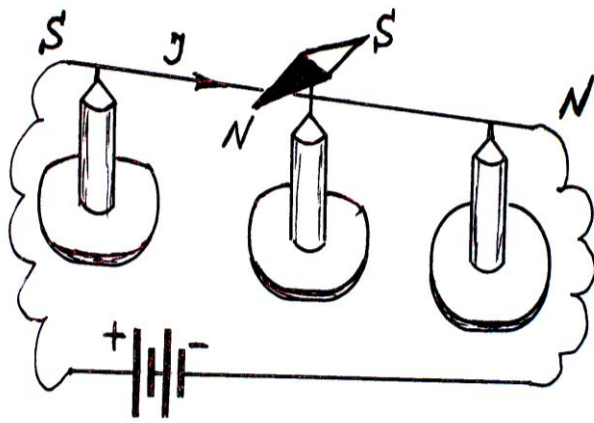


Рис. 14.1

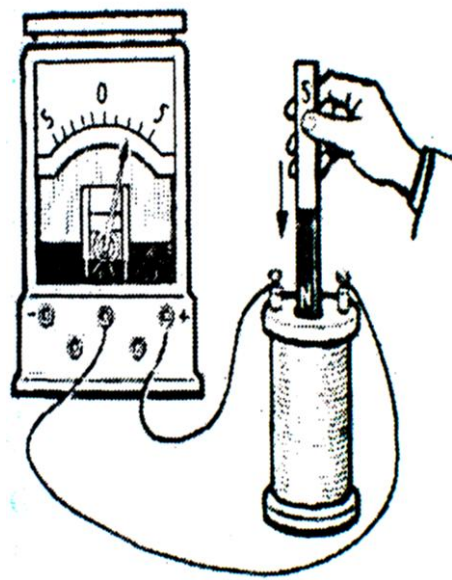


Рис. 14.2

Сформулюємо закон електромагнітної індукції Фарадея: *при будь-якій зміні магнітного потоку, що пронизує контур провідника, в ньому виникає електрорушійна сила електромагнітної індукції (ЕРС індукції), яка прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку:*

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}; \quad \varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (14.1)$$

Зміну магнітного потоку можна визначити за площею, що перетинає провідник за час t (рис.14.3):

$$d\Phi = B \cdot dS \cdot \cos \alpha; \quad \Delta\Phi = B \cdot \Delta S \cdot \cos \alpha. \quad (14.2)$$

Якщо провідник рухається під кутом α до напрямку силових ліній магнітного поля, ЕРС індукції можна також обчислити за формулою:

$$\varepsilon_i = -\frac{Blv\Delta t \cos \alpha}{\Delta t} = -Blv \cos \alpha. \quad (14.3)$$

Якщо контур провідника замкнути, то в електричному колі виникає струм. Напрямок індукційного струму визначають за правилом (законом) Ленца: *індукційний струм у замкненому провіднику має такий напрямок, при якому його власне магнітне поле протидіє змінам зовнішнього магнітного поля, які збуджують індукційний струм* (рис. 14.4).

Індукційні струми, що виникають у масивних провідниках, називаються струмами Фуко. Для зменшення струмів Фуко сердечники трансформаторів набирають із тонких пластин. Струми Фуко використовують також для плавки і поверхневого загартування сталей.

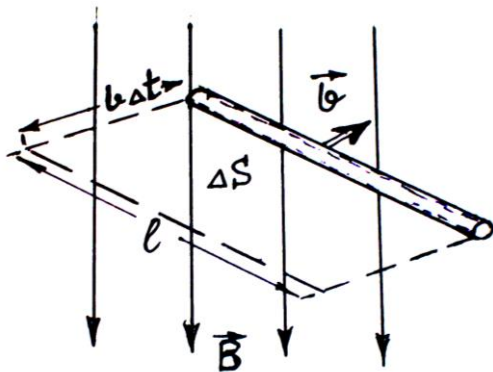


Рис. 14.3



Рис. 14.4

14.2. Явище самоіндукції. Індуктивність

При будь-якій зміні електричного струму виникає магнітне поле, що змінюється в часі. Таке магнітне поле повинно викликати появу індукційного електричного поля. У цьому випадку індукційне електричне поле повинно зменшувати швидкість зміни струму в колі. Розглянемо процеси замикання і розмикання кола постійного струму (рис.14.5). Нехай електричне коло, що складається із джерела струму і послідовно з'єднаних вимикача, котушки і лампочки, розімкнено. При замиканні кола лампочка загоряється з деяким запізненням – струм наростає (збільшується) поступово (рис. 14.6), досягаючи деякого значення I_0 .

Якщо тепер закоротити джерело струму вимикачем, то

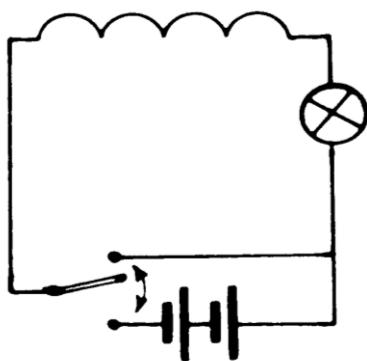


Рис. 14.5

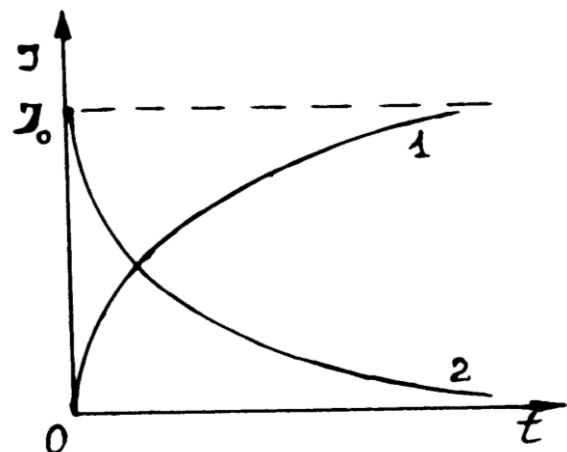


Рис. 14.6

світіння лампочки буде зменшуватися поступово – струм у колі буде підтримуватися магнітним полем. Якщо котушка з великим числом витків містить феромагнітний сердечник, то при замиканні

або розмиканні кола сила струму може збільшитися до такої величини, що лампочка може перегоріти.

Виникнення ЕРС індукції в ланцюзі при зміні сили струму в ній називається явищем самоіндукції. Зміна магнітного потоку прямо пропорційна зміні сили струму, тому можна записати: $\Delta\Phi = \Delta(L \cdot I)$, де коефіцієнт пропорційності L називається індуктивністю. У разі діамагнітного або парамагнітного середовища коефіцієнт $L = \text{const}$, тоді $\Delta\Phi = L \cdot \Delta I$ і електрорушійна сила самоіндукції визначатиметься за формулами:

$$\varepsilon_c = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt}; \quad \varepsilon_c = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (14.4)$$

З формули (14.4) видно, що **індуктивність – це коефіцієнт пропорційності між швидкістю зміни струму в ланцюзі і ЕРС самоіндукції.** Знак «мінус» у формулі впливає з правила Ленца. Одиницю індуктивності Генрі одержимо за формулою:

$$L = \frac{\varepsilon_c \cdot \Delta t}{\Delta I}. \quad (14.5)$$

Підставивши $\varepsilon_c = 1\text{В}$, $\Delta t = 1\text{с}$, $\Delta I = 1\text{А}$, одержимо:

$$\boxed{\boxed{\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}} = 1\text{Гн(генрі)}}}$$

Генрі – індуктивність провідника, у якому при швидкості зміни струму 1А за секунду індукується ЕРС самоіндукції 1В . На практиці використовують менші одиниці індуктивності – мілігенрі і мікрогенрі: $1\text{Гн} = 10^3 \text{мГн} = 10^6 \text{мкГн}$.

Індуктивність провідника залежить від його розмірів, форми і навколишнього середовища. Індуктивність котушки збільшується при збільшенні числа витків і розміщенні усередину сердечника (стрижня) з феромагнітного матеріалу.

14.3. Енергія магнітного поля

Після розмикання кола (рис. 14.5) через лампочку якийсь час буде текти убутний струм, підтримуваний виниклою в соленоїді ЕРС самоіндукцією. Робота струму за малий час Δt дорівнює:

$$A = \varepsilon_c \cdot I_{cp} \cdot \Delta t = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \cdot I_{cp} \cdot \Delta t = L \cdot I_{cp} \cdot \Delta I. \quad (14.6)$$

Струм у колі убуває від I до 0 , зміна струму $\Delta I = I - 0 = I$. звідки

$I_{cp} = \frac{1}{2} I$. Робота іде на збільшення внутрішньої енергії лампочки, звідки випливає, що енергія магнітного поля становить:

$$W = A = \frac{LI \cdot I}{2} = \frac{LI^2}{2}. \quad (14.7)$$

Контрольні запитання

1. У чому полягає явище електромагнітної індукції?
2. Запишіть формулу ЕРС електромагнітної індукції.
3. Сформулюйте правило Ленца.
4. У чому полягає явище самоіндукції?
5. Запишіть формулу ЕРС самоіндукції.
6. Що називають індуктивністю?
7. У яких одиницях вимірюється індуктивність?
8. Які одиниці індуктивності ви знаєте?
9. Від чого залежить індуктивність котушки?
10. Запишіть формулу енергії магнітного поля.

15. КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ

15.1. Коливальний рух. Гармонійні коливання

Коливальним називається будь-який рух, при якому значення фізичної величини повторюються. *Коливальний рух, при якому значення фізичної величини повторюються через однакові проміжки часу, називається періодичним.* Коливальний рух – один з найпоширеніших рухів у природі. Коливаються молекули, атоми, маятники годинників, вода в морях і океанах, величина магнітного поля Землі, струни музичних інструментів і т.д. Механічними коливаннями називаються повторювані в часі рухи тіл або їхніх частин. Найцікавішими коливальними рухами є гармонійні коливання.

Гармонійним називається періодичний коливальний рух, що відбувається за законом синуса або косинуса, наприклад, зсув від положення рівноваги у будь-який довільний момент часу дорівнює:

$$x = A \cos(\omega_0 t + \alpha), \quad (15.1)$$

де x – зсув від положення рівноваги; A – максимальний зсув (амплітуда); ω_0 – циклічна частота коливання; α – початкова фаза коливання; $(\omega_0 t + \alpha)$ – фаза коливання.

Розглянемо коливання проєкцій радіуса-вектора точки, що рухається по колу радіуса A проти часової стрілки (рис.15.1).

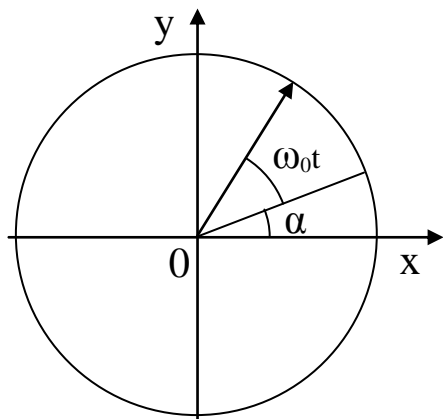


Рис. 15.1

У початковий момент часу $t = 0$ радіус-вектор становить із віссю Ox кут α . За час t радіус-вектор описує кут $\omega_0 t$. **Фаза коливань** $(\omega_0 t + \alpha)$ – кут між амплітудою і довільно обраним у просторі напрямком (віссю). Знайдемо період коливань. Період коливань – це час одного повного коливання. Періодичність гармонійної функції 2π , тому період коливань визначимо зі співвідношення:

$$\omega_0(t + T) + \alpha = \omega_0 t + \alpha + 2\pi.$$

Після скорочень одержимо формулу періоду будь-яких коливань:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}. \quad (15.2)$$

Циклічна частота пов'язана з періодом і частотою ν такими співвідношеннями:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu. \quad (15.3)$$

Фазу коливання можна записати так:

$$\omega_0 t = \frac{2\pi}{T} t. \quad (15.4)$$

З формули (15.4) видно, що **фаза коливання показує, яка частина періоду пройшла від початку коливання.**

Визначимо швидкість і прискорення при гармонійному коливанні. Швидкість дорівнює похідній за часом від зсуву (15.5):

$$v = \frac{dx}{dt} = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \alpha) = -v_{\max} \sin(\omega_0 t + \alpha). \quad (15.5)$$

Прискорення дорівнює похідній за часом від швидкості:

$$a = \frac{dv}{dt} = -A\omega_0^2 \sin(\omega_0 t + \alpha) = -a_{\max} \sin(\omega_0 t + \alpha) = -\omega_0^2 x. \quad (15.6)$$

Нехай матеріальна точка рухається під дією пружної сили $F = -kx$. Запишемо рівняння руху:

$$ma = -kx, \quad (15.7)$$

де прискорення точки дорівнюватиме:

$$a = \frac{dv}{dt} = -\frac{k}{m}x = -\omega_0^2 x, \quad (15.8)$$

де $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ – циклічна частота.

Будь-яка сила, що прямо пропорційна величині зсуву і спрямована у бік рівноваги називається квазіпружною. Система, що рухається під дією квазіпружної сили здійснює гармонійний коливальний рух.

15.2. Пружний, математичний і фізичний маятники

Пружний маятник – це тіло масою m , що підвішене на пружині і здійснює гармонійні коливання під дією пружної сили $F = -kx$, де k – коефіцієнт пружності (рис. 15.2).

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (15.9)$$

де $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ – циклічна частота.

Підставивши значення ω_0 у формулу (15.9), отримаємо:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (15.10)$$

Період коливань пружного маятника не залежить від амплітуди.

Математичний маятник – це матеріальна точка, яка здійснює малі коливання на довгій, невагомій і нерозтяжній нитці (рис. 15.3) під дією сили ваги. Складова сили тяжіння, яка повертає маятник у положення рівноваги пропорційна відхиленню від положення рівноваги і напрямлена у бік рівноваги ($F = -mg \sin \alpha$).

При малих кутах відхилення маятника, поворотальна сила квазіпружна:

$$F = -mg \sin \alpha = -mg \frac{x}{\ell} = -kx, \quad (15.9)$$

де x – зміщення точки; ℓ – довжина нитки маятника.

Прискорення маятника дорівнюватиме:

$$a = -\frac{x}{\ell} g = -\omega_0^2 x. \quad (15.10)$$

З формули (15.10) випливає:

$$\omega_0^2 = \frac{g}{\ell}. \quad (15.11)$$

Період коливань математичного маятника становитиме:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}. \quad (15.12)$$

Період коливань математичного маятника довжиною ℓ при малих кутах відхилення не залежить від амплітуди (15.12).

Фізичний маятник – будь-яке тверде тіло, що здійснює коливання під дією сили $F = -mg \sin \alpha$ навколо горизонтальної осі, що не проходить через центр його ваги (рис.15.4).

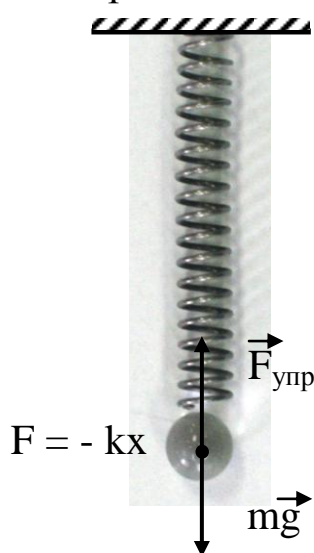


Рис. 15.2

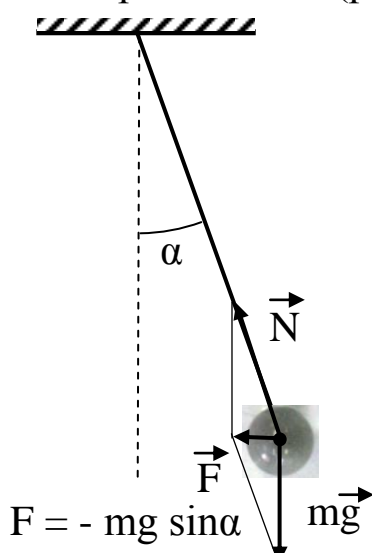


Рис. 15.3

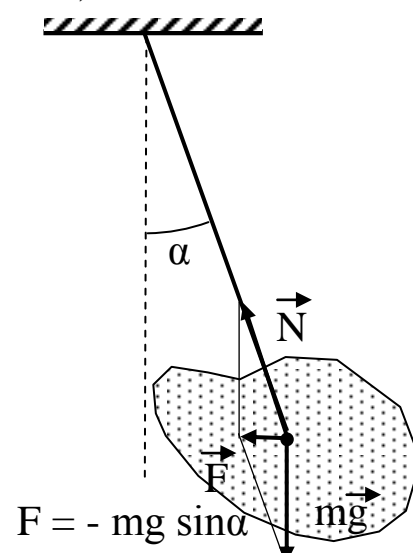


Рис. 15.4

Якщо маятник вивести з положення рівноваги, то на нього діятимемо обертальний момент сили тяжіння:

$$M = -mg\ell \sin \alpha, \quad (15.13)$$

де ℓ – відстань від центра мас до точки підвішування.

При малих кутах відхилення $\sin \alpha \approx \alpha$ і обертальний момент:

$$M = -mg\ell\alpha. \quad (15.14)$$

Згідно з основним законом динаміки обертального руху, прискорення тіла визначаємо за формулою:

$$\varepsilon = \frac{d^2\alpha}{dt^2} = \frac{M}{J}, \quad (15.15)$$

де J – момент інерції тіла відносно осі коливання.

Розв'язання цього рівняння – гармонійна функція з періодом:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mg\ell}}. \quad (15.16)$$

Для фізичного маятника можна підібрати такий математичний маятник, який матиме однаковий період коливання з фізичним. Зведена довжина такого фізичного маятника:

$$\ell_3 = \frac{J}{m\ell}. \quad (15.17)$$

Точка на фізичному маятнику, яка відповідає зведеній довжині, називається центром коливань.

За формулою (15.16) можна отримати період коливань математичного маятника. Момент інерції матеріальної точки на відстані ℓ від осі коливань становить $J = m\ell^2$, тому період коливань математичного маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mg\ell}} = 2\pi \sqrt{\frac{m\ell^2}{mg\ell}} = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}. \quad (15.18)$$

Кінетичну енергію будь-яких гармонійних коливань можна визначити за формулою:

$$W^{\text{кін}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{m\omega_0^2 A^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}. \quad (15.19)$$

Потенціальна енергія коливань:

$$W^{\text{ном}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{m\omega_0^2 A^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}. \quad (15.20)$$

Повна енергія гармонійних коливань пропорційна масі, квадрату амплітуди і квадрату частоти коливань:

$$W = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = \frac{mA^2\omega_0^2}{2}. \quad (15.21)$$

15.3. Додавання гармонійних коливань

1. *Складання коливань однакового напрямку.* Нехай точка одночасно бере участь у двох коливаннях уздовж осі x :

$$x_1 = A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_{01}), \quad x_2 = A_2 \cos(\omega_0 t + \varphi_{02}). \quad (15.22)$$

Додавання можна виконати за допомогою векторної діаграми, (рис. 15.5), де A_1, A_2 – положення векторів амплітуди в початковий момент часу, A – вектор амплітуди результуючого коливання. Результуючий рух є гармонійне коливання з коловою частотою ω_0 :

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (15.23)$$

де амплітуда і початкова фаза результуючого коливання:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \varphi_{02} - \varphi_{01}}; \quad (15.24)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{A_y}{A_x} = \frac{A_1 \sin \varphi_{01} + A_2 \sin \varphi_{02}}{A_1 \cos \varphi_{02} + A_2 \cos \varphi_{02}}. \quad (15.25)$$

Якщо частоти коливань, що складаються, мало відрізняються ($\omega_2 = \omega + \Delta\omega$), то рівняння коливань мають вигляд:

$$x_1 = A \cos \omega t, \quad x_2 = A \cos(\omega t + \Delta\omega)t. \quad (15.26)$$

Результуюче коливання подібне до гармонійного, але з повільно змінюваною амплітудою. Такі коливання мають назву *биття* (рис 15.6):

$$x = x_1 + x_2 = \left(2A \cos \frac{\Delta\omega}{2} t \right) \cdot \cos \omega t. \quad (15.27)$$

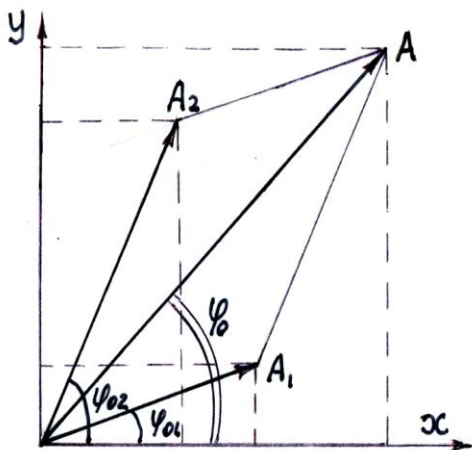


Рис. 15.5

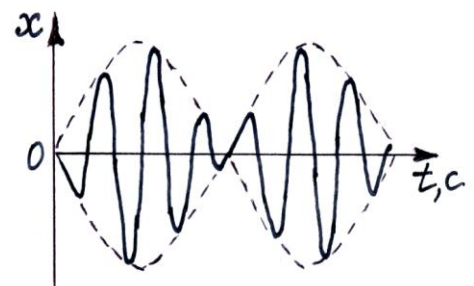


Рис. 15.6

2. Складання взаємно перпендикулярних коливань. Нехай точка одночасно бере участь у коливаннях уздовж осі ОХ та ОУ, причому різниця фаз $0,5\pi$:

$$x = A_1 \cos \omega_0 t, \quad y = A_2 \cos(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}), \quad (15.28)$$

Після математичних перетворень отримаємо канонічне рівняння еліпса:

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} = 1. \quad (15.29)$$

Таким чином, точка рухається по еліптичній траєкторії, а при $A_1 = A_2 = R$ точка рухається по колу. Під час складання взаємно перпендикулярних коливань різних частот одержують траєкторії руху, які називаються фігурами Ліссажу.

15.4. Загасаючі і вимушені коливання. Резонанс

У реальних системах діють сили опору, тому коливання згасають. Другий закон Ньютона для системи, в якій діють сили тертя, має вигляд:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx + F_m, \quad (15.30)$$

де сила тертя пропорційна швидкості руху:

$$F_m = -r v = -r \frac{dx}{dt}, \quad (15.31)$$

де r – коефіцієнт тертя.

При малому терті розв'язання рівняння має вигляд:

$$x = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha_0), \quad (15.32)$$

де $\beta = \frac{r}{m}$ – коефіцієнт загасання; $A = A_0 e^{-\beta t}$ – «амплітуда» загасаючих коливань.

Період загасаючих коливань залежить від коефіцієнта загасання:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}. \quad (15.33)$$

Ступінь загасання характеризують логарифмічним декрементом загасання:

$$\delta = \ln \frac{A_t}{A_{t+T}} = \ln \frac{A_0 e^{-\beta t}}{A_0 e^{-\beta (t+T)}} = \ln e^{\beta T} = \beta T. \quad (15.34)$$

Коефіцієнт загасання і логарифмічний декремент загасання зв'язані залежністю:

$$\delta = \beta T = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{N}, \quad (15.35)$$

де $\tau = \frac{1}{\beta}$ – проміжок часу, протягом якого амплітуда коливань зменшується в e разів (час релаксації); N – кількість коливань за час зменшення амплітуди в e разів.

Вимушені коливання виникають під дією зовнішньої періодичної змінної сили, наприклад, $F = F_0 \cos \omega t$. Рівняння руху за другим законом Ньютона має вигляд:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx - r \frac{dx}{dt} + F_0 \cos \omega t, \quad (15.36)$$

або:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = f_0 \cos \omega t, \quad (15.37)$$

де $f_0 = F_0/m$.

Розв'язання диференціального рівняння (15.37) має вигляд:

$$x = A \cos(\omega_0 t + \alpha_0); \quad (15.38)$$

$$A = \frac{f_0}{\sqrt{\omega_0^2 - \omega^2 + 4\beta^2 \omega^2}}; \quad \operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{-2\beta \omega}{\omega^2 - \omega_0^2}. \quad (15.39)$$

Таким чином, якщо на будь-яку коливальну систему діяти періодичною силою з частотою ω , то вона поповнюватиме коливальну систему енергією і система коливатиметься із цією ж частотою.

Якщо частота коливань зовнішньої вимушеної сили близька до власної частоти коливань системи ω_0 – спостерігається явище резонансу.

Резонанс – явище різкого (дуже значного) збільшення амплітуди коливань при збігу частоти власних коливань із

частотою сили, що змушує. На рис.15.7 показані графіки залежності амплітуди коливань від частоти з відсутністю і наявністю опору.

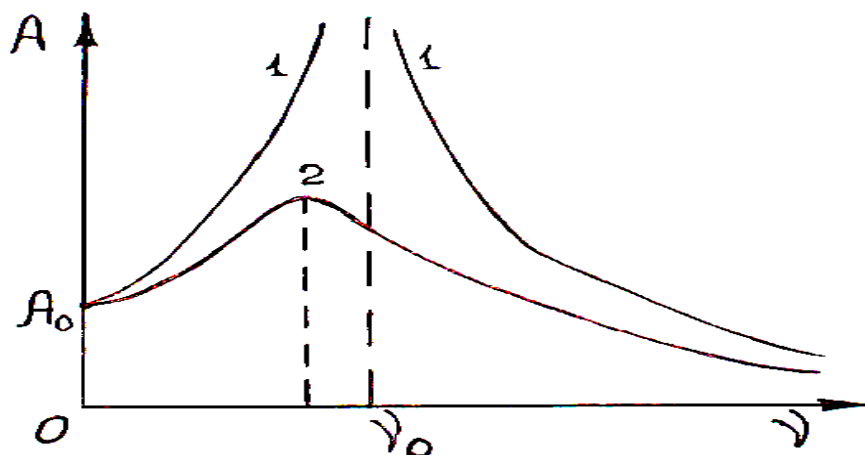


Рис.15.7

Якщо сили тертя незначні – амплітуда коливань при резонансі зростає до дуже значної величини (крива 1). При великому опорі коливанням резонансна крива згладжується (крива 2), а резонансна частота зменшується. Резонансну частоту можна знайти з умови мінімуму знаменника (15.39). Явище резонансу широко використовується в промисловості, наприклад, для ущільнення бетонної суміші, ґрунту і та ін.

Явище резонансу іноді завдає великої шкоди, руйнуючи мости, різні спорудження, машини і механізми.

Контрольні запитання

1. Який рух називається коливальним?
2. Які умови необхідні для виникнення коливального руху?
3. Які коливання називаються власними, вимушеними?
4. Що називається періодом, частотою, фазою коливань?
5. Який рух називається гармонійним коливанням?
6. Запишіть формулу зсуву при гармонійному коливанні.
7. Що називають математичним маятником?
8. Чому дорівнює період коливань математичного маятника?
9. Що називається фізичним маятником?
10. Запишіть рівняння згасаючих коливань.
11. Запишіть рівняння вимушених коливань.
12. Що називають логарифмічним коефіцієнтом згасання?
13. У чому полягає явище резонансу?

14. Запишіть формулу кінетичної енергії маятника.
 15. Запишіть формулу потенційної енергії маятника.

15.5. Механічні хвилі в пружному середовищі

Якщо в ставок зі спокійною поверхнею води кинути невеликий камінь, то від точки його падіння будуть розходитися кола. Таке збурювання називається хвилею. Можна переконатися: хоча вода й колишеться, вона не переміщається разом із хвилею. Під час проходження хвилі частки води рухаються лише вгору і вниз. Приклади хвиль ми можемо спостерігати повсюди. Спільним між ними є те, що в кожному випадку збурювання поширюється в деякому пружному середовищі, але середовище при цьому є нерухомим.

Хвиля – процес розповсюдження коливань (збурень) у пружному середовищі. На рис. 15.8 показаний процес збудження хвилі, яка біжить уздовж струни

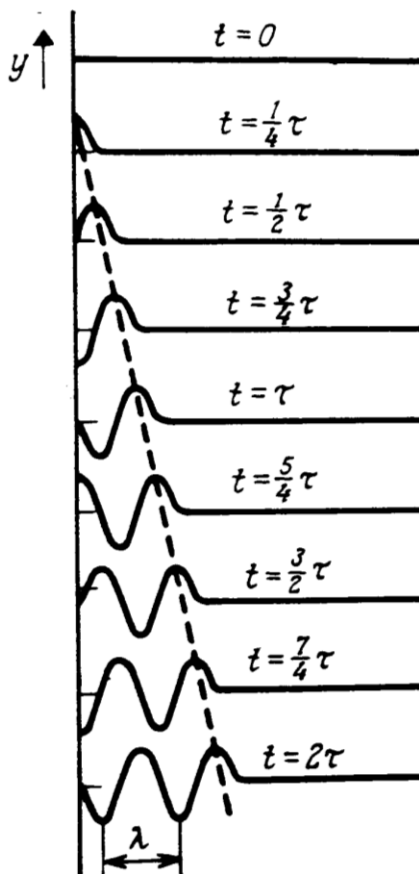


Рис. 15.8

музичного інструмента. Лівий кінець струни коливається вгору і вниз за гармонійним законом.

Хвилі, у яких коливання частинок середовища відбуваються перпендикулярно до напрямку поширення, називаються поперечними. Вони являють собою опуклості і западини, що чергуються. Поперечні хвилі можливі в тому разі, коли зміна форми супроводжується появою квазіпружних сил. Поперечні хвилі виникають у твердих тілах і на поверхні рідини. Хвилі на поверхні рідини є гравітаційними. Якщо глибина рідини менша від довжини хвилі – виникають капілярні хвилі.

Хвилі, у яких коливання частинок середовища відбуваються вздовж напрямку поширення, називаються поздовжніми. Якщо взяти довгу пружину

і різко вдарити по одному з її кінців, то по ній побіжать згущення і розрядження її витків. Поздовжні хвилі можуть поширюватися у

твердих, рідких, газоподібних середовищах, плазмі. Поздовжні хвилі пов'язані з об'ємною пружною деформацією, тому можуть виникати в будь-якому середовищі.

Процес поширення коливань у пружному середовищі відбувається не миттєво, а з деякою швидкістю. Швидкість хвилі залежить від пружних властивостей і щільності середовища. Відстань, на яку поширюються коливання за час одного періоду коливання, називається довжиною хвилі. На рис. 15.9 показано залежність зсуву частинок середовища від відстані до джерела коливань or для заданого моменту часу. Виразимо довжину хвилі через швидкість, період і частоту коливань:

$$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{\nu}. \quad (15.40)$$

На рис 15.9 також показано залежність зсуву частинки середовища x від часу для заданої точки середовища.

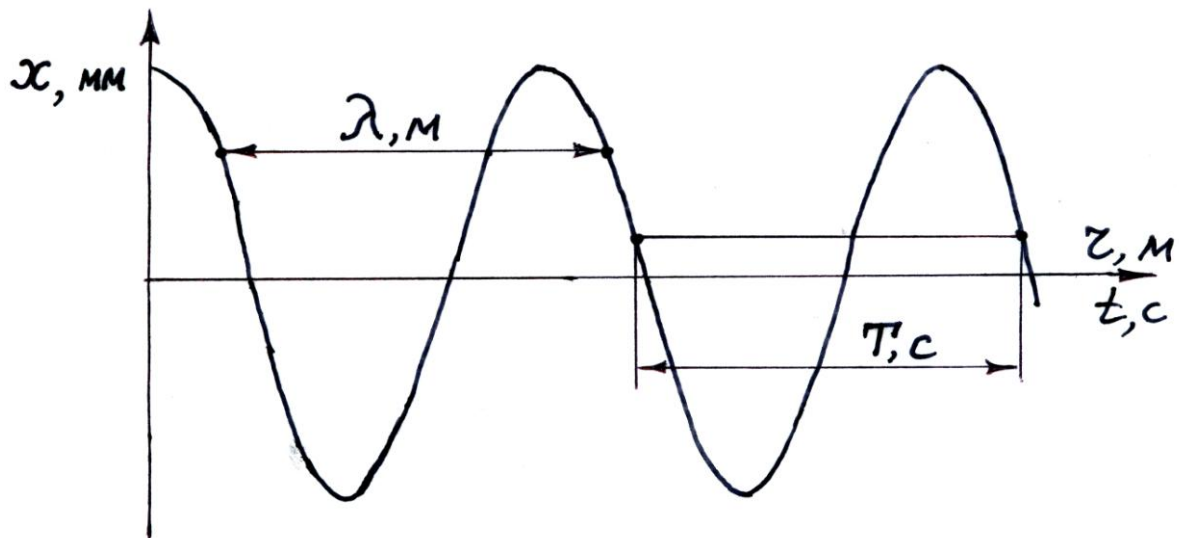


Рис.15.9

На рис. 15.9 видно, *що довжина хвилі – це відстань між точками середовища, що коливаються в однаковій фазі, а період – це час одного повного коливання.*

Отримаємо рівняння плоскої монохроматичної хвилі. Нехай хвиля поширюється вздовж напрямку or без згасання. У точці $r = 0$ коливання описується рівнянням:

$$x = A \cos \omega t. \quad (15.41)$$

До будь-якої точки у напрямку or коливання прийде із запізненням:

$$x = A \cos \omega \left(t - \frac{r}{v} \right) = A \cos \omega t - kr, \quad (15.42)$$

де $\omega \frac{r}{v} = \frac{2\pi \cdot r}{T \cdot v} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot r = kr$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число.

Наведений вираз (15.42) є рівнянням плоскої монохроматичної хвилі, яке дає змогу визначити зміщення кожної точки хвилі у будь-який момент часу. Множина точок середовища, що коливається в однаковій фазі, називається фронтом хвилі. Фронт хвилі знаходять, користуючись принципом Гюйгенса: **кожна точка середовища, до якої дійшла хвиля, стає джерелом вторинних сферичних хвиль. Обвідна поверхня вторинних хвиль дає положення новому фронту хвилі.**

Швидкість руху фіксованої фази хвилі називається фазовою швидкістю. Зафіксуємо фазу хвилі:

$$(\omega t - kr) = const. \quad (15.43)$$

Продиференціювавши цю рівність, отримаємо:

$$\omega - \frac{k \cdot dr}{dt} = 0, \text{ звідки } v = \frac{dr}{dt} = \frac{\omega}{k}. \quad (15.44)$$

При переході хвиль з одного середовища в інше частота коливань не змінюється, а довжина хвилі і швидкість залежать від властивостей середовища. Швидкість поздовжніх хвиль у твердих тілах

$$\sigma = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (15.45)$$

де E – модуль пружності або модуль Юнга, ρ – густина середовища. Швидкість поперечних хвиль у твердих тілах

$$\sigma = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (15.46)$$

де G – модуль зрушення.

Швидкість пружних (звукових) хвиль у газах або рідинах можна обчислити за формулою:

$$\sigma = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}, \quad (15.47)$$

де p – тиск у газі або рідині; ρ – густина середовища;

γ – числовий коефіцієнт. Для повітря коефіцієнт γ при кімнатній температурі дорівнює 1,4. Швидкість звуку в повітрі залежить від температури: при $0^{\circ}C - 332 \frac{m}{c}$; $15^{\circ}C - 342 \frac{m}{c}$; $100^{\circ}C - 386 \frac{m}{c}$.

Швидкість звуку в різних середовищах при $t = 0^{\circ}C$ становить:
у кисні $- 260 \frac{m}{c}$; воді $- 1450 \frac{m}{c}$; склі $- 5600 \frac{m}{c}$; водні $- 1280 \frac{m}{c}$; сталі $- 4900 \frac{m}{c}$.

Відзначимо, що поздовжні хвилі поширюються швидше ніж поперечні, тому що модуль Юнга більше модуля зрушення. Ця різниця використовується для визначення відстані до епіцентру землетрусу, тому що при землетрусах від епіцентру поширюються хвилі деформації земної кори (сейсмічні хвилі).

Звук являє собою механічні хвилі в пружних середовищах. Звукові хвилі в повітрі – поздовжні. Джерелом звуку завжди є тіла, які здійснюють коливання. Звук сприймається спеціальним органом почуттів людини і тварин – вухом. Необхідна умова сприйняття звуку – пружне середовище між джерелом звуку й вухом. Інтервал звукових частот, які чує людина 16 – 20000 Гц. **Коливання із частотами нижче 16 Гц називаються інфразвуками.** Коливання низької частоти досить великої потужності викликають хворобливі відчуття у людей і тварин. Частота власних коливань тіла людини 3 – 10 Гц, грудної клітини 5 – 18 Гц, черевної порожнини 3 -4 Гц відповідає частоті інфразвуків. Зниження рівня інтенсивності інфразвуків у приміщеннях – важлива задача. **Звукові коливання частотою більше 20000 Гц називаються ультразвуковими.** За допомогою ультразвукової локації дельфіни, кити, кажани, деякі інші тварини і навіть птах гуахаро знаходять їжу. Ультразвук використовується для очищення деталей після виливання виробів, прання тощо.

Сила звуку – об'єктивна характеристика звуку, що вимірюється звуковою енергією, яка проходить перпендикулярно до площини $1m^2$ за 1с:

$$I = \frac{W}{St}, \quad (15.48)$$

де W – енергія хвилі, S – площа, t – час. Сила звуку вимірюється у Вт/м².

Гучність звуку – суб'єктивна характеристика. Сила звуку тим більша, чим більша амплітуда звукових коливань.

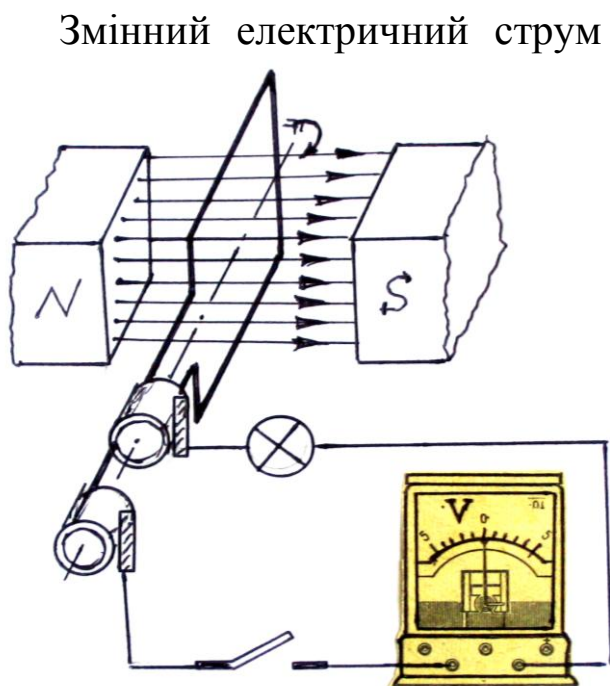
Тембр звуку – своєрідний «колір» звуку, спектр звукових коливань, що дозволяє розрізнити голосу людей, різні музичні інструменти і т.д.

Контрольні запитання

1. Що називають механічною хвилею? Які види хвиль ви знаєте?
2. Яка хвиля називається поздовжньою, поперечною?
3. У яких середовищах поширюються поздовжні хвилі?
4. У яких середовищах поширюються поперечні хвилі?
5. Що називається довжиною хвилі? Запишіть формулу.
6. Від чого залежить швидкість поширення хвиль?
7. Яка фізична величина не змінюється при переході хвилі з одного середовища в інше?
8. Напишіть формулу швидкості хвилі.
9. Що називають звуком? Що таке інфразвук, ультразвук?
10. Від чого залежить швидкість звуку?
11. Що таке сила, гучність, тембр звуку?

16. ЗМІННИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

16.1. Одержання змінного електричного струму



Змінний електричний струм – це змушені електромагнітні коливання. Сила струму і напруга в електричному колі змінюються за гармонійним законом. Стандартна частота змінного струму – 50 Гц. Звичайно для одержання змінного струму використовується обертовий рух плоскої котушки (рамки) у магнітному полі (рис.16.1). Машини для генерування змінного струму називаються електрогенераторами. Такий

Рис. 16.1

генератор змінного струму показаний на рис.16.2.

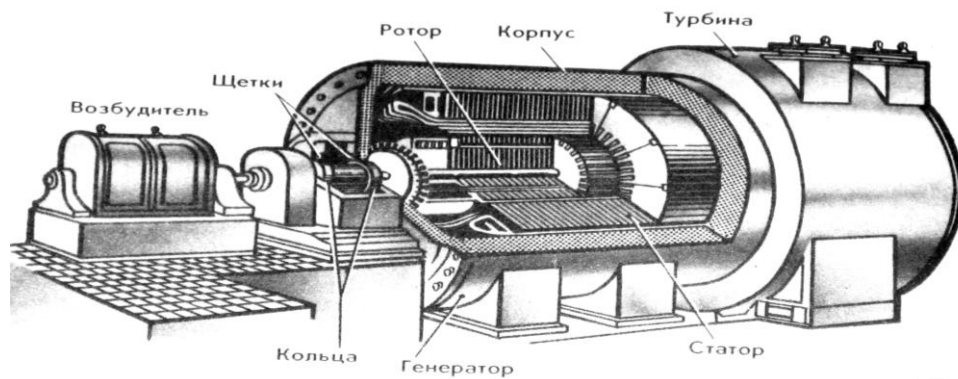


Рис16.2.

При рівномірному обертанні рамки (ротора) електричного генератора магнітний потік, що пронизує її площу, змінюватиметься за гармонійним законом:

$$\Phi = BS \cos \omega t, \quad (16.1)$$

де S – площа, ωt – фаза, що змінюється з часом.

За законом електромагнітної індукції е.р.с. дорівнює похідній від магнітного потоку за часом:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(BS \cos \omega t) = BS\omega \sin \omega t, \quad (16.2)$$

де $BS\omega = \varepsilon_m$ – максимальне значення е.р.с. Напруга на клеммах генератора також змінюється за законом синуса:

$$U = U_m \sin \omega t. \quad (16.3)$$

Якщо в електричне коло включити навантаження або резистор з активним опором R , то в колі піде струм:

$$I = \frac{U}{R} = I_m \sin \omega t. \quad (16.4)$$

З формул (16.3), (16.4) видно, що середнє значення напруги і сили струму дорівнює нулю, але миттєве значення потужності, яке виділяється на опорі R , дорівнює:

$$P = I^2 R = I_m^2 R \sin^2 \omega t. \quad (16.5)$$

Середнє значення $\langle \sin^2 \omega t \rangle = 0,5$, тому середнє значення потужності змінного струму:

$$P = \frac{1}{2} \cdot I_m^2 R = \frac{1}{2} \frac{U_m^2}{R}. \quad (16.6)$$

Значення постійного струму, що виділяє в провіднику таку саму кількість теплоти, що і змінний струм (за однаковий час), називається ефективним (діючим) значенням змінного струму:

$$I_{ef}^2 R = \frac{I_m^2}{2} R. \quad (16.7)$$

З формули (16.7) випливають ефективні (середньоквадратичні) значення напруги і сили змінного струму:

$$I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; \quad U_{ef} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (16.8)$$

Ефективне значення сили струму і напруги в $\sqrt{2}$ разів менше від їх максимальних значень. Для виміру сили струму і напруги змінного струму використовують прилади, показання яких не залежать від напрямку струму. Електровимірювальні прилади змінного струму градуують в ефективних значеннях.

16.2. Опір в електричному колі змінного струму

Якщо в колі змінного струму є тільки активний опір R , то струм і напруга коливаються у фазі, а вся електроенергія переходить у теплову енергію в електроплитах, лампах розжарювання. Котушки індуктивності і ємності (конденсатори) збільшують опір кола. У колі з індуктивним опором (рис.16.3) виникає е.р.с. самоіндукції, що частково компенсує напругу в колі. **Струм відстає за фазою від напруги** (рис. 16.4). Індуктивний опір прямо пропорційний індуктивності і циклічній частоті:

$$X_L = \omega L. \quad (16.9)$$

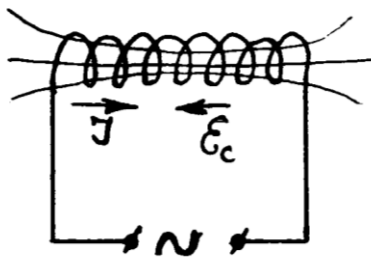


Рис. 16.3

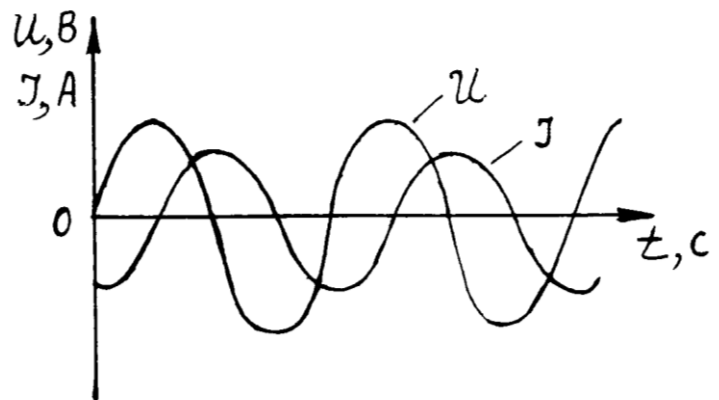


Рис. 16.4

У колі з ємкісним опором (рис. 16.5) *струм випереджає за фазою напругу* (рис. 16.6). Ємкісний опір обернено пропорційний ємності і циклічній частоті струму:

$$X_c = \frac{1}{\omega C}. \quad (16.10)$$

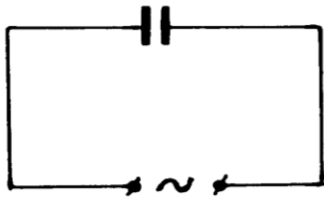


Рис. 16.5

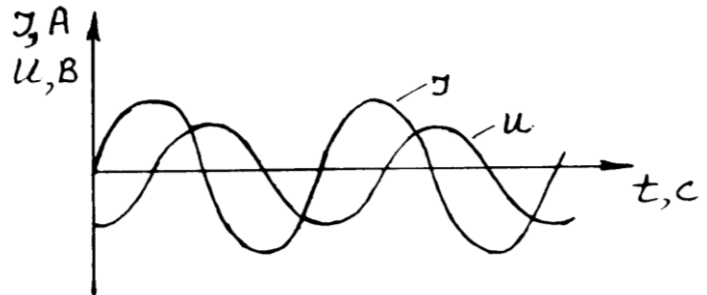


Рис. 16.6

Якщо електричне коло складається з активного опору R і реактивного $(\omega L - 1/\omega C)$ (рис. 16.7), то повний опір кола (імпеданс) Z обчислюють за формулою:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (16.11)$$

Повний опір кола змінного струму можна знайти за допомогою векторної діаграми (рис. 16.8).

Якщо індуктивний опір дорівнює ємкісному в електричному ланцюзі, то спостерігається резонанс ($Z = R$).

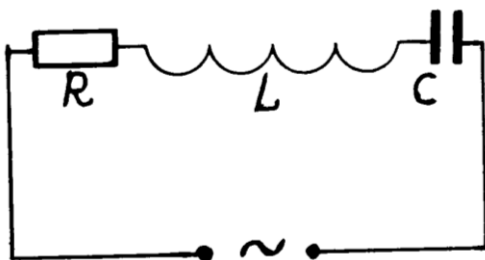


Рис. 16.7

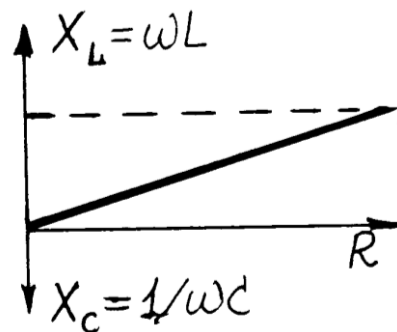


Рис. 16.8

Зрушення фаз між струмом і напругою в колі змінного струму знаходять за формулою:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - 1/\omega C}{R}. \quad (16.12)$$

Для кола змінного струму закон Ома має вигляд:

$$I = \frac{U}{Z}. \quad (16.13)$$

Потужність змінного струму обчислюють за формулою:

$$P = I_{ef} U_{ef} \cos \varphi, \quad (16.14)$$

де φ – зрушення (різниця) фаз між струмом і напругою.

16.3. Передача і використання електроенергії

Для передачі електроенергії потрібні високі напруги, а для практичного застосування – низькі. Для перетворення змінного струму високої напруги у низьку застосовують трансформатори.

Трансформатор – пристрій для перетворення електричного струму і напруги. Найпростіший трансформатор складається з двох або декількох котушок (обмоток) на загальному замкненому залізному сердечнику (рис. 16.9; 16.10).

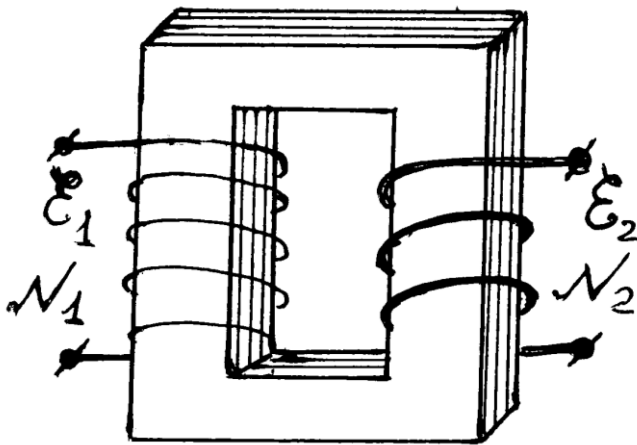


Рис. 16.9

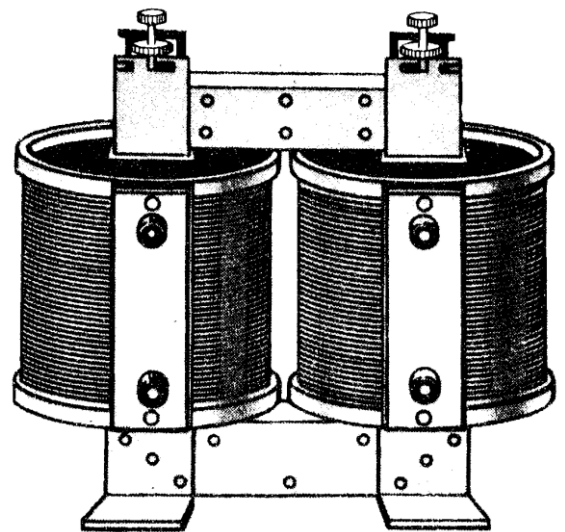


Рис. 16.10

Якщо через первинну обмотку іде струм, то в ній виникає е.р.с. самоіндукції:

$$\varepsilon_1 = -N_1 \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}, \quad (16.15)$$

де N_1 – кількість витків первинної обмотки.

Магнітний потік пронизує витки всіх обмоток, тому у вторинній обмотці виникає е.р.с. взаємної індукції:

$$\varepsilon_2 = -N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (16.16)$$

Якщо вторинна обмотка розімкнена (режим холостого ходу), то в ній також виникає е.р.с. самоіндукції, яка протилежна за напрямком напруги: $\varepsilon_2 = -U$.

Миттєві значення ε_1 і ε_2 змінюються у фазі (одночасно), звідки визначають їх відношення:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \approx \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k. \quad (16.17)$$

Величина k називається коефіцієнтом трансформації. Якщо коефіцієнт $k > 1$ – трансформатор підвищувальний. **Коефіцієнт трансформації – фізична величина, що дорівнює відношенню числа витків первинної обмотки до числа витків вторинної.**

Сердечники трансформаторів виготовляють з тонких пластин м'якого заліза, ізольованих одна від одної шаром лаку для зменшення вихрових індукційних струмів (струмів Фуко), які виникають у сердечниках трансформаторів. Коефіцієнт корисної дії трансформаторів більший ніж 90 %, тому можна вважати, що потужності в первинній і вторинній обмотці приблизно однакові $\varepsilon_1 I_1 = \varepsilon_2 I_2$. Із цієї формули видно, що струми в колах обернено пропорційні числу витків.

Під час передачі електричної енергії на велику відстань відбуваються більші втрати енергії, що йде на нагрівання проводів. Для зменшення втрат енергії необхідно:

- зменшувати силу струму за рахунок збільшення напруги;
- зменшувати опір проводів у електричних мережах;
- використовувати надпровідникові провідники.

Контрольні запитання

1. Як змінюється е.р.с. і струм під час рівномірного обертання рамки в однорідному магнітному полі?
2. Напишіть формули для миттєвого значення сили струму, е.р.с. і напруги.

3. Що називається ефективним (діючим) значенням сили змінного струму?
4. Напишіть формули ефективних значень сили струму і напруги.
5. Від чого залежить індуктивний опір? Напишіть формулу.
6. Від чого залежить ємнісний опір? Напишіть формулу.
7. Напишіть формулу повного опору кола змінного струму.
8. Напишіть закон Ома для кола з трьох послідовно з'єднаних опорів R , X_L , X_C .
9. Що називається трансформатором?
10. Який трансформатор називається підвищувальним?
11. Який трансформатор називається понижувальним?
12. Що називається коефіцієнтом трансформації?
13. Яке явище лежить в основі роботи трансформатора?

17. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ

17.1. Вільні коливання в коливальному контурі

Електричними коливаннями називаються періодичні (або майже періодичні) зміни заряду, сили струму або напруги.

Електричні коливання одержують в електричному колі, що

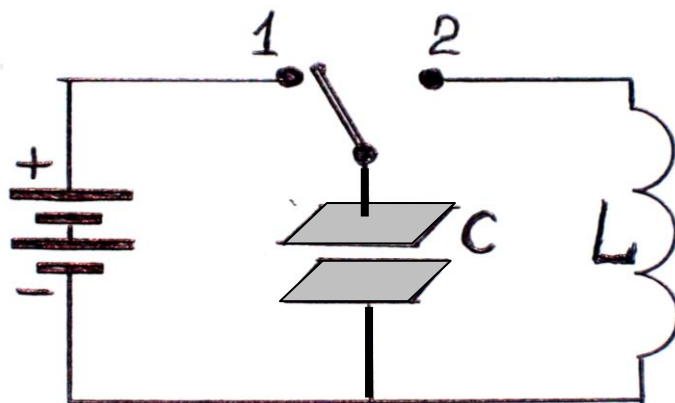


Рис. 17.1

містить послідовно з'єднані конденсатор і котушку індуктивності (рис. 17.1).

Таке електричне коло називається коливальним контуром. З'ясуємо, чому в такому контурі виникають коливання? Зарядимо конденсатор, з'єднавши його на короткий час із джерелом струму за допомогою

перемикача. Конденсатор одержить енергію:

$$W_c = \frac{q_m^2}{2C}, \quad (17.1)$$

де q_m – повний заряд конденсатора, C – електроємність.

При перемиканні в положення 2 (рис.17.1) конденсатор почне розряджатися і у колі з'явиться електричний струм. Сила струму збільшується не відразу, що викликано явищем самоіндукції. Виникле магнітне поле, що змінюється, породжує вихрове електричне поле, що спрямоване проти напрямку струму й перешкоджає його миттєвій зміні. Під час розрядки конденсатора енергія електричного поля зменшується, але одночасно зростає енергія магнітного поля. Якщо електричний опір дорівнює нулю, то, повна енергія в будь-який момент часу дорівнює сумі енергій електричного і магнітного полів:

$$W = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = const. \quad (17.2)$$

де I – сила струму, L – індуктивність.

У той момент, коли конденсатор повністю розрядиться ($q = 0$), енергія магнітного поля буде максимальною ($I = I_m$). Електричні коливання в контурі аналогічні вільним механічним коливанням.

При пружних коливаннях тіла на пружині періодично змінюється координата тіла x і його швидкість, а при електричних коливаннях міняються заряд конденсатора q і сила струму в колі (рис.17.2).

Згідно з другим законом Кірхгофа, для коливального контуру з опором R визначаємо:

$$IR + U_c = \varepsilon_s \quad (17.3)$$

де IR – падіння напруги на резисторі, $U_c = \frac{q}{C}$ – напруга на конденсаторі, $\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt}$ – е.р.с. самоіндукції. Отже,

$$L \frac{dI}{dt} + IR + \frac{q}{C} = 0. \quad (17.4)$$

Якщо опір проводів у контурі R дорівнює нулю, то враховуючи, що $I = \frac{dq}{dt}$ та $\frac{dI}{dt} = \frac{d^2q}{dt^2}$, одержимо диференціальне рівняння вільних коливань заряду:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{q}{LC} = 0. \quad (17.5)$$

Розв'язання рівняння (17.5) являє собою гармонічну функцію:

$$q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (17.6)$$

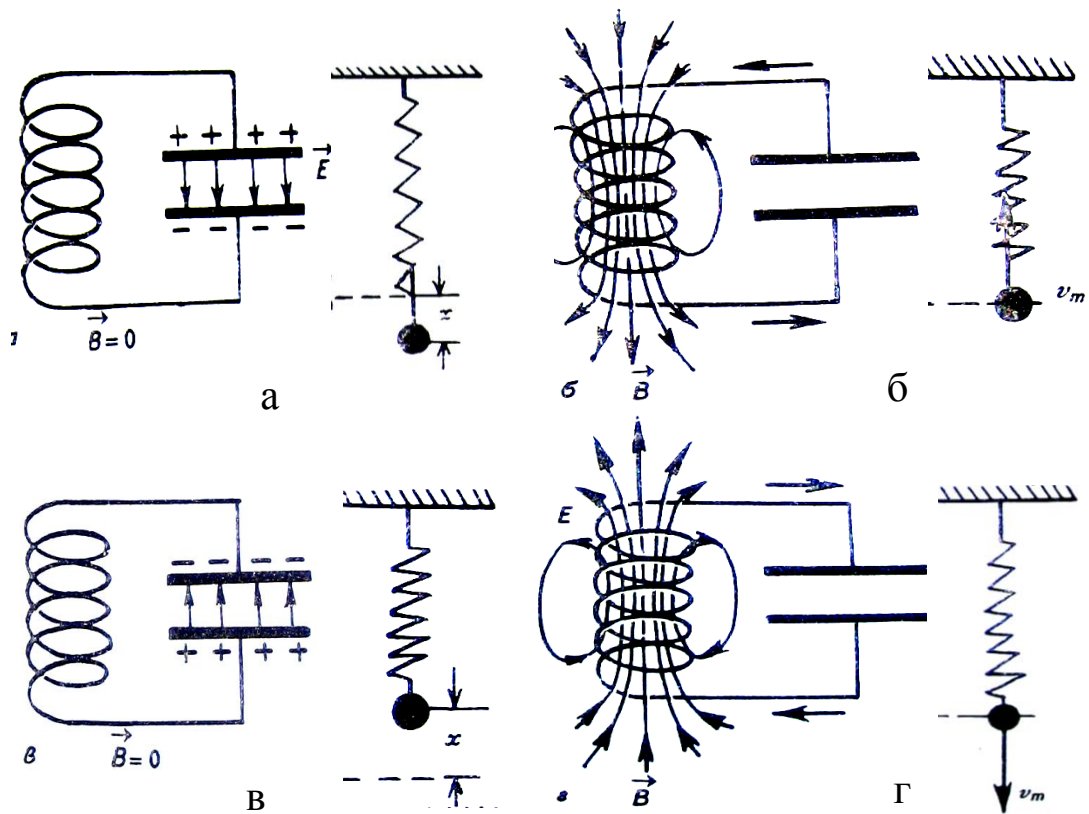


Рис. 17.2

де $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – власна частота контуру; φ_0 – початкова фаза коливаний.

Період гармонійних коливаний (формула Томсона):

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (17.7)$$

Сила струму здійснює гармонійні коливання за законом:

$$I = \frac{dq}{dt} = -q_m \omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = I_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}), \quad (17.8)$$

де $I_m = q_m \omega_0$ – амплітуда сили струму.

Напруга на конденсаторі:

$$U_c = \frac{q}{C} = \frac{q_m}{C} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (17.9)$$

де $U_m = \frac{q_m}{C}$ – амплітуда напруги.

Коливання сили струму випереджають за фазою коливання заряду на $0,5\pi$.

За допомогою коливального контуру можна одержувати електромагнітні коливання високої частоти. Реальний коливальний контур завжди має омичний опір, тому коливання в ньому загасають.

17.2. Одержання незгасаючих електромагнітних коливань

Незгасаючі електричні коливання одержують за допомогою генераторів. На рис. 17.3 показано спрощену схему генератора на транзисторі. Коливальний контур LC підключений до джерела постійної напруги послідовно із транзистором. В емітер – базове коло (е-б) транзистора включена котушка зворотного зв'язку L_{oc} , що індуктивно пов'язана з коливальним контуром. Для спостереження коливань паралельно до контуру включений осцилограф. При підключенні джерела живлення через транзистор пройде імпульс струму, що зарядить конденсатор, і в контурі виникнуть коливання. На кінцях котушки зворотного зв'язку

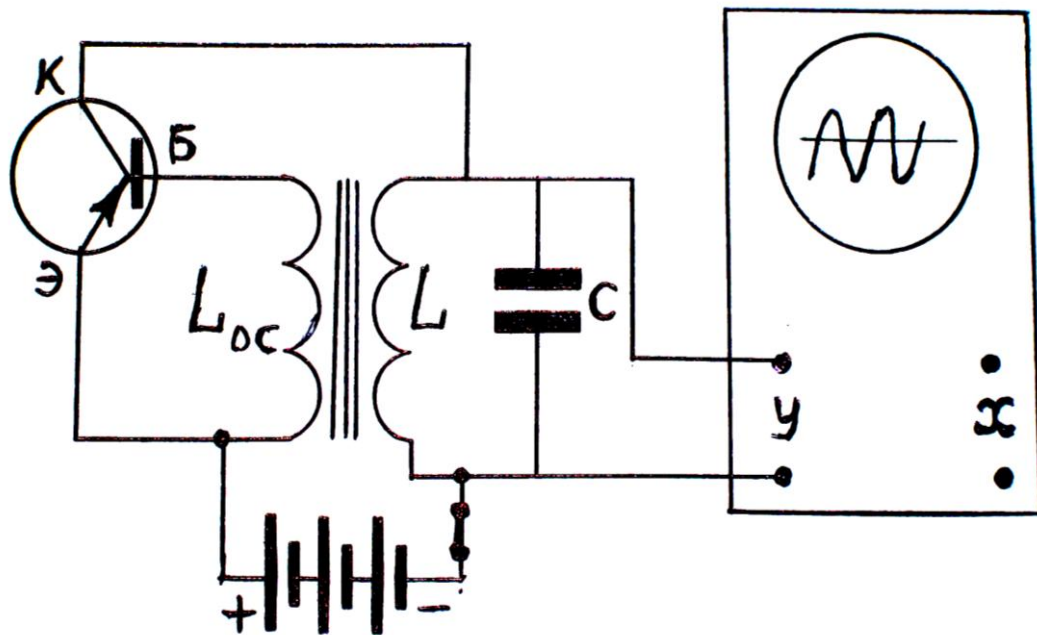


Рис. 17.3

виникає змінна напруга. Ця напруга подається на емітер, і через транзистор проходять імпульси струму. Роль транзистора – включення і вимикання джерела постійної напруги, за рахунок енергії якого в коливальному контурі підтримуються незгасаючі коливання.

17.3. Електромагнітні хвилі

Аналізуючи експериментальні роботи Ерстеда, Ампера та Фарадея, у кінці ХІХ ст.. англійський учений Максвелл розробив теорію єдиного електромагнітного поля, створеного системою зарядів і струмів. За законом Фарадея, при зміні магнітного потоку, що пронизує замкнений контур, в останньому виникає електрорушійна сила індукції $\varepsilon_i = -\frac{d\Phi_m}{dt}$. Максвелл висунув гіпотезу, що **при зміні магнітного поля виникає змінне електричне поле** незалежно від того є замкнений провідник чи його немає:

$$\oint_{\ell} \vec{E} d\vec{\ell} = -\frac{d\Phi_m}{dt}, \quad (17.10)$$

де \vec{E} – напруженість вихрового електричного поля.

Оскільки $\Phi_m = \int \vec{B} d\vec{S}$, формулу (17.10) можна подати у такому вигляді:

$$\oint_{\ell} \vec{E} d\vec{\ell} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} d\vec{S} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}, \quad (17.11)$$

що є математичним вираженням першого рівняння Максвелла в інтегральній формі: **циркуляція вектора напруженості електричного поля по замкненому контуру дорівнює швидкості зміни магнітного потоку крізь поверхню, обмежену контуром.**

Друге рівняння Максвелла стверджує, що магнітних зарядів у природі не існує:

$$\oint_{\ell} \vec{B} d\vec{S} = 0. \quad (17.12)$$

Далі Максвелл припустив, що при зміні електричного поля виникає змінне магнітне поле:

$$\oint_{\ell} \vec{H} d\vec{\ell} = \frac{\partial \Phi_e}{\partial t} = \frac{d}{dt} \int_S \vec{D} d\vec{S} = \int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} d\vec{S}, \quad (17.13)$$

де потік вектора електростатичної індукції $\Phi_e = \int_S \vec{D} d\vec{S}$.

Якщо заряджений конденсатор замкнути провідником (котушкою), то при розряді конденсатора в соленоїді і між

обкладками виникне змінне електричне поле, що, у свою чергу, генерує змінне магнітне поле і т.д. (рис.17.4).

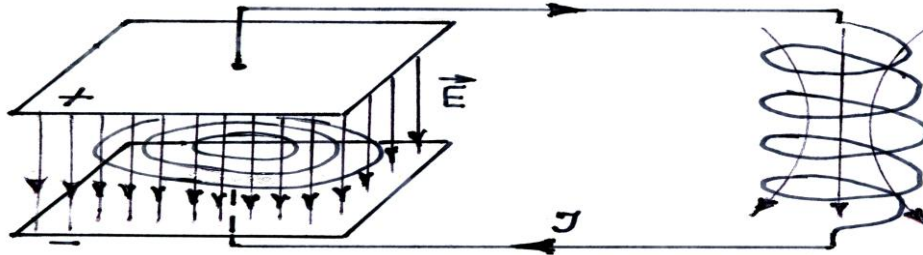


Рис. 17.4

За Максвеллом, струми провідності у електричному колі замінюються струмами електричного зміщення (струмами електричної індукції) між обкладками конденсатора:

$$I_{зм} = \int_S \vec{j}_{зм} d\vec{S} = \int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} d\vec{S}.$$

З теорії Максвелла випливало, що у просторі, де немає струмів і зарядів (у вакуумі), електромагнітне поле повинно існувати у вигляді поперечних хвиль, які повинні розповсюджуватися зі швидкістю $3 \cdot 10^8$ м/с (рис. 17.5).

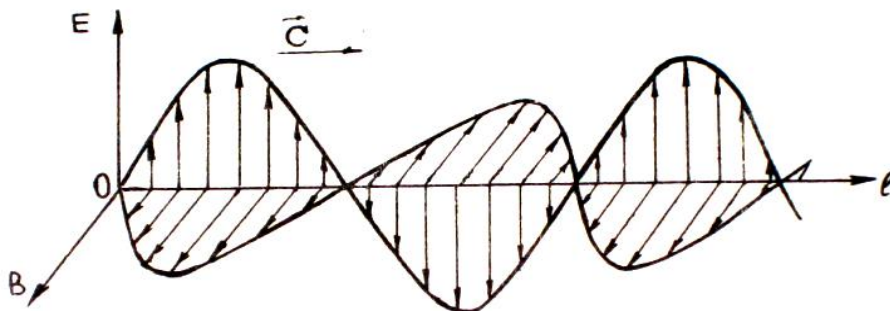


Рис. 17.5

Уперше в експерименті у 1888 р. німецький учений Генріх Герц одержав електромагнітні хвилі за допомогою розрядника та індукційної котушки. А передачу умовних сигналів (точки і тире азбуки Морзе) на відстань до 250 м уперше вдалося здійснити російському вченому А. С. Попову у 1895 р.

Основна ідея радіозв'язку, що винайшов А.С. Попов, – **керування джерелом струму прийнятими слабкими сигналами.** Пізніше, незалежно від А.С. Попова, аналогічні дослідження були проведені італійським інженером Г. Марконі. Велика заслуга Г. Марконі полягає у широкому впровадженні електромагнітних хвиль для розвитку радіозв'язку.

17.4. Випромінювання і прийом електромагнітних хвиль

Електричне поле звичайного (закритого) коливального контуру концентрується між обкладками конденсатора, а магнітне – усередині котушки індуктивності. Для випромінювання електромагнітних хвиль у простір необхідно розсунути обкладки конденсатора. Такий контур називається відкритим (рис. 17.6).

Як виявив А. С. Попов для збільшення потужності випромінювання необхідно одну обкладку конденсатора заземлити, а до другої приєднати довгий провідник. Такий провідник назвали антеною.

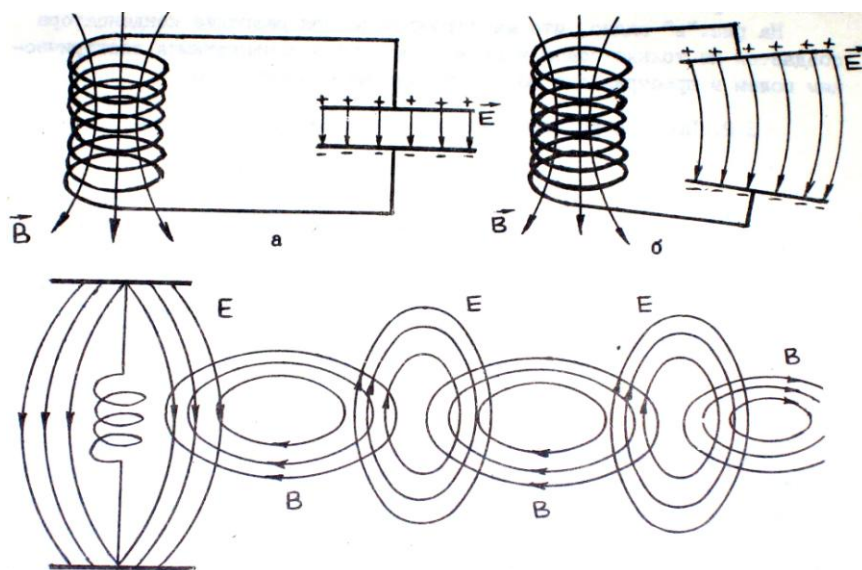


Рис. 17.6

Після винаходу лампового генератора вдалося збільшити дальність радіозв'язку і передавати не тільки точки і тире азбуки Морзе, але й звуки. Простий радіозв'язок можна здійснити так.

Коливання високої частоти, створювані генератором, модулюються коливаннями звукової частоти й випромінюються за допомогою антени. Електромагнітні хвилі індукують коливання в приймальному контурі, що настроєний у резонанс передавальної станції.

Радіохвилі з різною довжиною по-різному поширюються в атмосфері Землі. Довгі хвилі огинають Землю, але швидко загасають, короткі та ультракороткі поширюються прямолінійно і відбиваються іонізованими шарами атмосфери.

Телебачення – передача зображень, що рухаються, на відстань. На телевізійному центрі за допомогою спеціальних електронно-променевих трубок – відиконів – зображення об'єкта і звук перетворюються в систему відеосигналів, які модулюють

несійну ультрависоку частоту (УВЧ). Передане зображення розбивається на сотні тисяч окремих елементів, кожному з яких відповідає окремий сигнал. Ультракороткі хвилі ($\lambda = 0,1 - 10$ м) сильно поглинаються поверхнею Землі й іоносферою, тому прийом телепередач можливий тільки на відстані прямої видимості. У цей час у телебаченні використовують супутники – ретранслятори.

Радіолокація – виявлення різних об'єктів і визначення їхнього положення в просторі. Радіолокація заснована на явищі відбиття ультракоротких хвиль від об'єктів, що опромінюють. Практична радіолокація і телебачення стали можливі після винаходу у 1924 р. в Харкові А.А. Слуцкіним магнетрона. *Магнетрон* – вакуумна лампа, у якій обертовим пучком електронів керують за допомогою магнітного поля. Магнетрон дозволяє генерувати імпульсні коливання ультрависокої частоти великої потужності.

Радіолокатор складається з потужного імпульсного передавача, спрямованої антени, приймача, настроєного на частоту передавача, і індикаторного пристрою. Для точного визначення положення об'єкта, крім відстані, потрібно знати кут у горизонтальній площині між напрямком на об'єкт і на північ та кут від горизонтальної площини до напрямку на об'єкт.

Контрольні запитання

1. Хто з учених передбачав існування електромагнітних хвиль?
2. Хто експериментально одержав електромагнітні хвилі?
3. Електромагнітна хвиля поздовжня чи поперечна?
4. Що називають коливальним контуром?
5. Що коливається в коливальному контурі?
6. Проведіть аналогію між механічними й електричними коливаннями.
7. Напишіть формулу Томсона.
8. Для чого застосовується генератор?
9. Який коливальний контур називається відкритим?
10. Яка взаємозв'язок між швидкістю, частотою і довжиною хвилі?
11. Чому дорівнює швидкість світла у вакуумі?
12. Хто вперше передав умовні сигнали за допомогою електромагнітних хвиль?

18. ГЕОМЕТРИЧНА ОПТИКА

18.1. Розвиток поглядів на природу світла

Геометрична оптика розглядає світло на основі уявлень про нього як сукупність світлових променів – ліній, уздовж яких розповсюджується енергія світлових електромагнітних хвиль.

Світло – одне з дивних явищ природи. Під дією світла і тепла розвивається і підтримується життя на Землі. Світло дає можливість одержати інформацію про навколишній світ. Що ж таке світло? Перша наукова теорія світла була створена Ньютоном. *За теорією Ньютона, світні тіла випускають дрібні частки – корпускули, які летять з великою швидкістю.*

Гіпотеза Ньютона пояснила широко відомі в той час світлові явища, наприклад, прямолінійне поширення, відбиття і заломлення світла.

Майже одночасно з Ньютоном Гюйгенс висунув хвильову гіпотезу про природу світла. *Відповідно до цієї гіпотези, світло – це поперечна хвиля.* Такі хвилі можуть існувати тільки в пружному середовищі. Тому Гюйгенс припустив, що Всесвіт заповнений невидимим пружним середовищем – світловим ефіром. Пізніше цю гіпотезу уточнив Френель.

Теорія Френеля пояснила такі явища, як прямолінійність поширення і дифракція світла. Однак ця теорія також мала ряд протиріч. У середині 19 ст. на зміну теорії Гюйгенса приходять електромагнітна теорія Максвелла.

За теорією Максвелла, світло – електромагнітна хвиля яка розповсюджується у вакуумі зі швидкістю $3 \cdot 10^8$ м/с. Світло однієї частоти називається монохроматичним. Таке світло наші очі сприймають як певні кольори. Наприклад, частота світла $4 \cdot 10^{14}$ Гц викликає відчуття червоних кольорів, а частота $7,5 \cdot 10^{14}$ Гц – фіолетового.

Наприкінці ХІХ – на початку ХХ ст. був відкритий ряд таких явищ, як фотоефект, ефект Комптона, у яких світло проявляло корпускулярні властивості. Електромагнітна теорія Максвелла не могла пояснити природи теплового випромінювання.

Німецький учений М. Планк для пояснення природи теплового випромінювання у 1900 р. висунув гіпотезу про те, що атоми випромінюють світло порціями – *квантами*. Енергія кванта

світла визначається формулою Планка. Гіпотеза Планка була розвинена А. Ейнштейном.

Ейнштейн показав, що світло випромінюється, поширюється і поглинається порціями (квантами) – фотонами. Сучасна квантово-хвильова теорія враховує ці властивості світла. Для пояснення процесу поширення пружних хвиль Гюйгенс висунув загальний принцип, що одержав назву принципу Гюйгенса: *кожна точка середовища, до якого дійшла хвиля, стає джерелом вторинних сферичних хвиль, а обвідна цих хвиль указує нове положення фронту хвилі* (рис. 18.1).

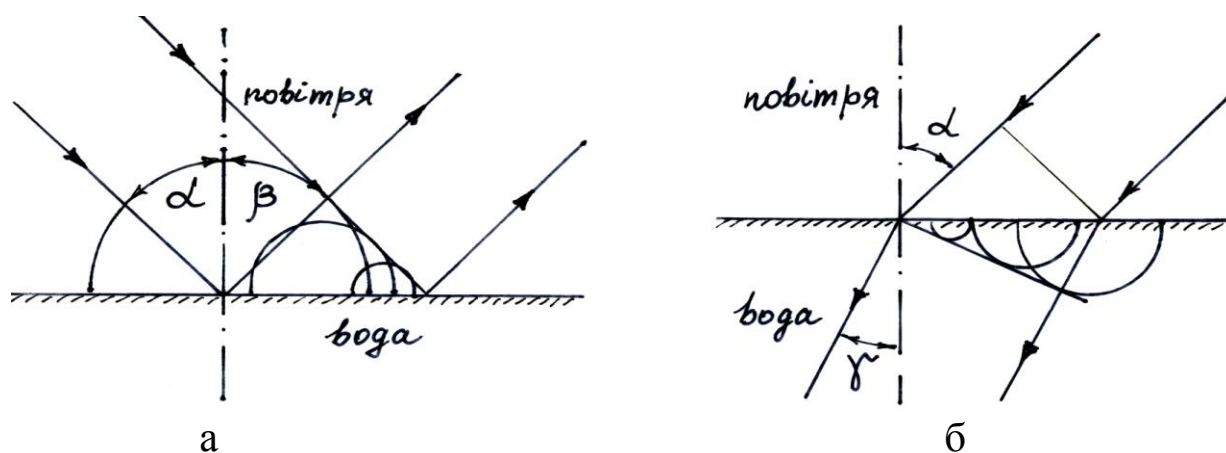


Рис.18.1

Геометричне місце точок, які коливаються в однакових фазах, називається хвильовою поверхнею, а передня поверхня – фронтом хвилі. Напрямок поширення хвилі називають *променем*.

Якщо знехтувати малою величиною довжини світлової хвилі, то ряд оптичних явищ можна пояснити з погляду геометричної оптики. Основні закони геометричної оптики такі:

- 1) закон прямолінійного поширення;
- 2) закон незалежності світлових пучків;
- 3) закони відбиття світла;
- 4) закони заломлення світла.

Швидкість світла у вакуумі вперше виміряв датський астроном Рьомер у 1675 р. під час спостереження затьмарення одного із супутників Юпітера. Перші досліди з визначення швидкості світла на Землі провів Фізо у 1849 р., а більш точні виміри були виконані американським ученим Майкельсоном за допомогою інтерферометра. Сучасні вимірювання швидкості світла базуються на дуже точних вимірах частоти випромінювання лазера.

18.2. Закони відбиття світла

Якщо світловий потік падає на поверхню будь-якого тіла, то частина падаючого світла відбивається. Закони відбиття світла були встановлені експериментально.

1. Відбитий промінь лежить у тій же площині, у якій лежать падаючий промінь і перпендикуляр, відновлений у точці падіння променя.

2. Кут відбиття дорівнює куту падіння $\alpha = \beta$ (рис. 18.1, а).

Таким чином, падаючий і відбитий промені оборотні. Якщо падаючий промінь направити по шляху відбитого, то відбитий промінь піде по шляху падаючого. Бачити предмети ми можемо тільки в тому разі, коли від них до нас в око попадає світло. Якщо промені, що падають на поверхню, паралельні і залишаються паралельними після відбиття, то таке відбиття є дзеркальним. Якщо поверхня шорсткувата – відбиття дифузне.

Швидкість світла у вакуумі є максимально можливою швидкістю в природі. Швидкість світла в різних середовищах зменшується. Вона залежить від оптичної щільності середовища. Мірою оптичної щільності є абсолютний показник заломлення. При переході світла з одного середовища в інше довжина хвилі змінюється прямо пропорційно швидкості світла в цьому середовищі:

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{v_2}{v_1}. \quad (18.1)$$

Контрольні запитання

1. Хто дав перше наукове пояснення світла? Що являє собою світло відповідно до цієї теорії?
2. Хто перший запропонував хвильову гіпотезу про природу світла?
3. Хто створив електромагнітну теорію світла?
4. Електромагнітні хвилі якої частоти можна віднести до видимого світла?
5. Яке світло називається монохроматичним?
6. Дайте визначення довжини світлової хвилі. Напишіть формулу.
7. Чому дорівнює швидкість світла у вакуумі?
8. Що змінюється при переході хвилі з одного середовища в інше?

9. Напишіть формулу Планка. Поясніть її.
10. Яка природа світла?
11. Як поширюється світло в однорідному середовищі?
12. Сформулюйте принцип Гюйгенса.
13. Що називають променем?
14. Сформулюйте основні закони геометричної оптики.

18.3. Побудова зображення у сферичному дзеркалі

Сферичним дзеркалом називається дзеркальна поверхня кулястої або параболоїдної форми. Якщо світло відбивається від внутрішньої поверхні, то дзеркало – увігнуте, якщо від зовнішньої поверхні – дзеркало опукле. Центр кулястої поверхні називається **оптичним центром дзеркала**. Пряма лінія, що проходить через полюс дзеркала P і оптичний центр $ПFO$, називається **головною оптичною віссю дзеркала** (рис. 18.3, 18.4). Будь-яка пряма, що проходить через оптичний центр і будь-яку точку дзеркала, називається **побічною оптичною віссю**. Промені, що йдуть паралельно до головної оптичної осі, після відбиття в дзеркалі перетинаються в точці, що називається **фокусом дзеркала**. Відстань між фокусом і полюсом дзеркала PF називається **фокусною відстанню**. У увігнутого дзеркала фокус дійсний, в опуклого уявний, і зображення в ньому завжди уявне. Пучок променів, які падають на опукле дзеркало, розсіюється, а їхні уявні продовження (показані пунктиром) перетинаються в точці, що називається уявним фокусом. Площина, що проходить через фокус перпендикулярно до головної оптичної осі, називається **фокальною площиною**. Фокусна відстань для променів, що йдуть паралельно на невеликій відстані від головної оптичної осі, дорівнює половині радіуса сфери $PF = \frac{R}{2}$. Для побудови зображення в дзеркалі необхідно накреслити хід будь-яких двох променів. Сформулюємо правила побудови зображень у дзеркалах:

- **промінь, що йде паралельно до головної оптичної осі, після відбиття проходить через фокус;**
- **промінь, що йде через оптичний центр дзеркала, після відбиття йде уздовж тієї ж прямої;**
- **промінь, що йде через фокус, після відбиття йде паралельно до головної оптичної осі.**

На рис. 18.2 і рис. 18.3 показаний хід променів, що падають на увігнуте й опукле дзеркала паралельно до головної оптичної осі. Як приклад побудуємо зображення в увігнутому й опуклому дзеркалах (рис.18.4, 18.5).

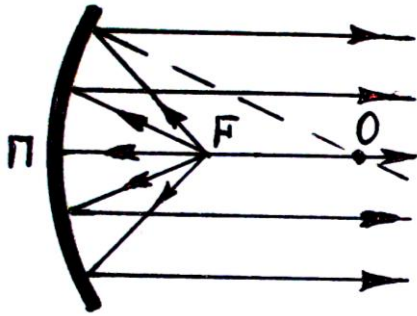


Рис. 18.2

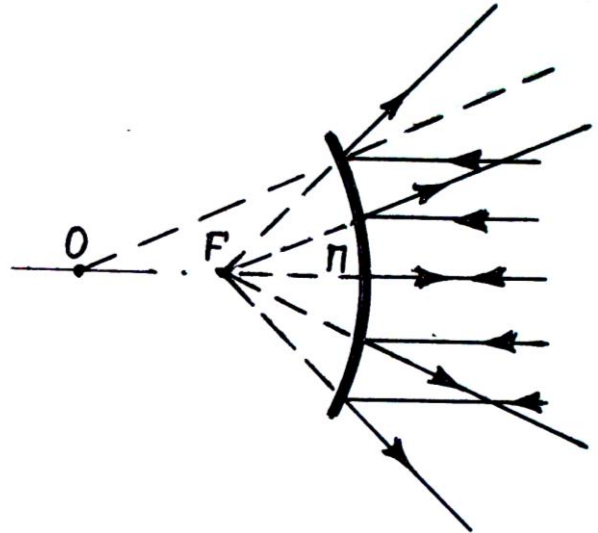


Рис. 18.3

Фокусна відстань F пов'язана з відстанями від дзеркала до зображення предмета f і відстанню від дзеркала до предмета d (див. рис.18.4, 18.5) такою формулою:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}. \quad (18.2)$$

Для опуклого дзеркала f і F беруть із знаком «мінус».

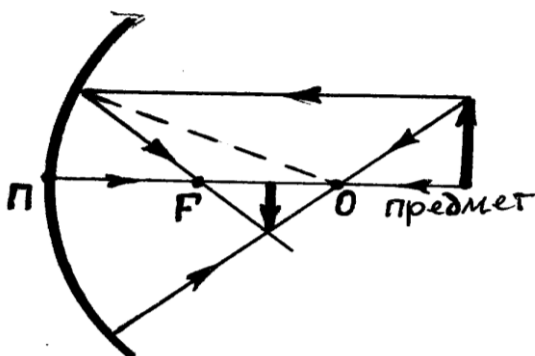


Рис. 18.4

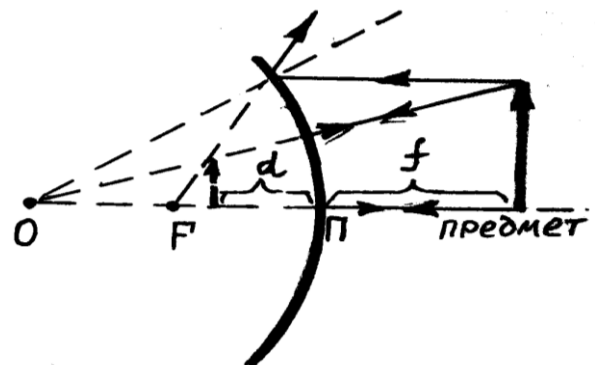


Рис. 18.5

Контрольні запитання

1. Яке відбиття називається дзеркальним?
2. Яке відбиття називається дифузним?
3. Сформулюйте закони відбиття світла.
4. Що називають сферичним дзеркалом?
5. Які сферичні дзеркала ви знаєте?
6. Що називають фокусом дзеркала?
7. Що називають оптичним центром дзеркала?
8. Напишіть формулу сферичного дзеркала.

18.4. Закони заломлення світла

Під час падіння пучка світла на межу розділення двох прозорих середовищ частина світла відбивається, а частина переходить у друге середовище – заломлюється (рис. 18.6). На межі розділу двох середовищ змінюються швидкість і довжина світлової хвилі. Частота світла і її зорове відчуття (кольори) не змінюються.

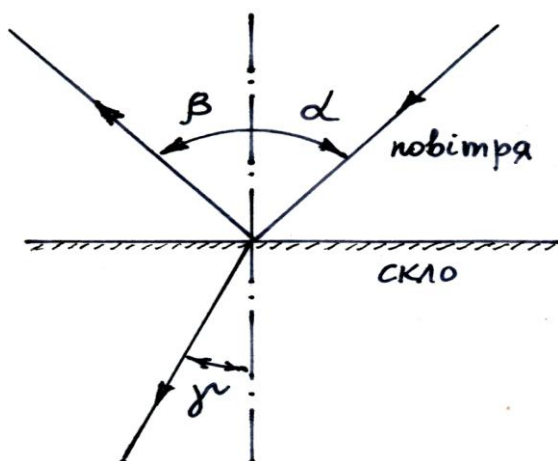


Рис.18.6

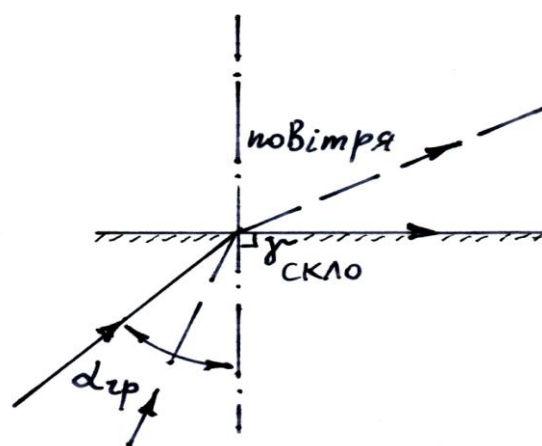


Рис.18.7

Зміна напрямку променя світла під час перетинання межі розділення двох середовищ називається **заломленням світла**.

Сформулюємо закони заломлення:

- **Заломлений і падаючий промені лежать в одній площині з перпендикуляром, відновленим у точці падіння променя.**
- **Відношення синуса кута падіння променя α до синуса кута заломлення γ не залежить від кута падіння:**

$$n_{\text{від}} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}. \quad (18.3)$$

Це відношення називається відносним показником заломлення другого середовища відносно першого. **Абсолютний показник заломлення середовища n** (перше середовище – вакуум) **показує, у скільки разів швидкість світла у вакуумі більша, ніж у заданому середовищі:**

$$n_{\text{від}} = \frac{c}{v}, \quad (18.4)$$

де c – швидкість світла у вакуумі.

При переході променя світла з оптично більш щільного середовища в менш щільне кут заломлення більший від кута падіння. При досягненні деякого граничного значення кута падіння $\alpha_{\text{зр}}$ кут заломлення буде дорівнює $\frac{\pi}{2}$ (рис. 18.7). При $\alpha > \alpha_{\text{зр}}$ падаючий промінь повністю відбивається. Це явище називається повним внутрішнім відбиттям. При граничному куті падіння зі скла у повітря показник заломлення:

$$n_{\text{відн}} = \frac{\sin \alpha_{\text{зр}}}{\sin \gamma} = \frac{1}{n_1}, \quad (18.5)$$

де n_1 – показник переломлення скла відносно повітря, $\sin \gamma = \sin 90^\circ = 1$, тоді:

$$\sin \alpha_{\text{зр}} = \frac{1}{n_1}. \quad (18.6)$$

Знаючи показник заломлення середовища, можна знайти граничний кут повного внутрішнього відбиття. Явище повного внутрішнього відбиття використовується для передачі якісного зображення.

Контрольні запитання

1. Сформулюйте закони заломлення світла.
2. Що називають абсолютним показником заломлення?
3. Що називають відносним показником заломлення?
4. Що називають повним внутрішнім відбиттям?
5. Як обчислити граничний кут повного внутрішнього відбиття?

18.5. Оптичні прилади

Лінзою називається прозоре для світла тіло, що обмежене поверхнями сферичної, циліндричної або параболічної форми.

Розглянемо сферичні лінзи. На рис. 18.8 наведені схематичні малюнки двоопуклої, плоско-опуклої, двоввігнутої, плоско-вгнутої і опукло-вгнутої форм. Радіуси сферичних поверхонь, що обмежують лінзу, називаються **радіусами кривизни** лінзи. Далі будемо розглядати ідеальні тонкі лінзи. Центр лінзи O називається **оптичним центром** лінзи. Будь-яка пряма, що проходить через оптичний центр лінзи, називається **оптичною віссю** лінзи. Оптична вісь, що проходить через центр лінзи і центри сферичних поверхонь, що обмежують лінзу, називається **головною оптичною віссю**. Точка, у якій перетинаються заломлені лінзою промені (або їхні продовження), які йшли паралельно до головної оптичної осі, називається **фокусом лінзи** F . Відстань від фокуса до оптичного центра FO називається фокусною відстанню. Якщо у фокусі перетинаються промені, які вийшли з лінзи, фокус називається **дійсним**. Якщо у фокусі перетинаються продовження заломлених променів – фокус **уявний** (рис. 18.9).

Для побудови зображення в лінзі необхідно накреслити хід будь-

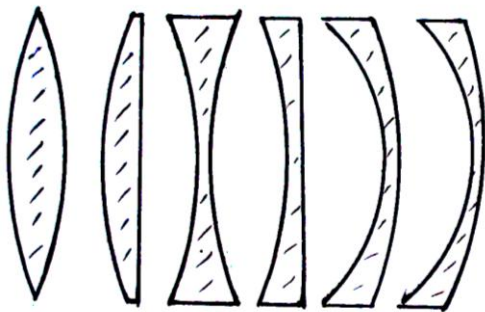


Рис. 18.8

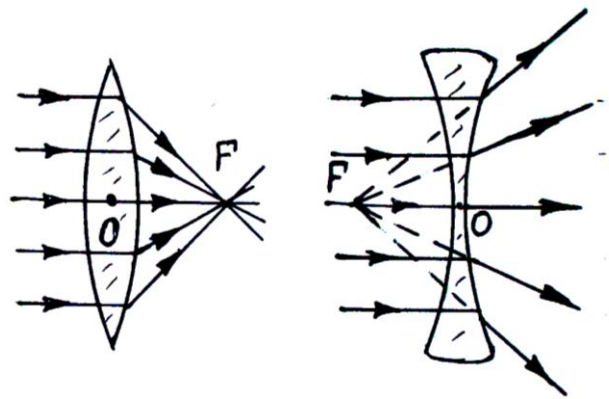


Рис. 18.9

яких двох променів. Сформулюємо правила побудови зображення в лінзах:

- промінь, що йде паралельно до головної оптичної осі лінзи, після заломлення у лінзі йде крізь фокус;
- промінь, що йде через оптичний центр (тонкої) лінзи, не змінює напрямку;

- промінь, що йде через фокус, після заломлення у лінзі йде паралельно до головної оптичної осі;

- промені, що йдуть паралельно до побічної оптичної осі, після заломлення в лінзі сходяться у фокальній площині.

На рис. 18.10, 18.11 наведено приклади побудови зображень в опуклій лінзі.

Між відстанню від предмета до лінзи d , відстанню від зображення до лінзи f і фокусною відстанню OF існує залежність,

що називається **формулою лінзи** (див. рис. 18.10):

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}. \quad (18.7)$$

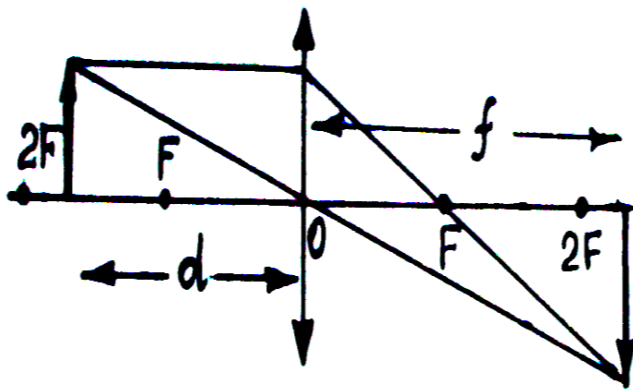


Рис. 18.10

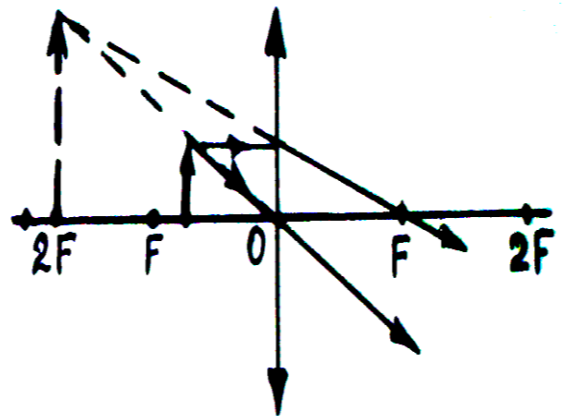


Рис. 18.11

У разі ввігнутої лінзи значення F і f – негативні.

Оптичні прилади призначені для перетворення світлових променів і являють собою набір лінз, дзеркал та призм.

Луна – збиральна лінза, що використовується для розгляду збільшеного зображення предмета. Під час розгляду предмета його поміщають між фокусом і лінзою. На рис. 18.11 показаний хід променів у лупі.

Мікроскоп призначений для розгляду дрібних предметів. У мікроскопі збільшене об'єктивом дійсне зображення предмета розглядають через окуляр.

Телескоп – прилад для спостереження небесних тіл. Телескоп збільшує не зображення, а кут, під яким ідуть промені від вилучених небесних тіл.

Фотоапарат – прилад, що дозволяє фіксувати оптичні зображення на фотоплівці або в цифровому вигляді. Основні частини фотоапарата – камера й об'єктив. Сучасні цифрові фотоапарати (цифрова фотокамера, ЦФК) у більшості власних зовнішніх характеристик та органів керування повторюють моделі плівкової фототехніки. Принципова різниця у «начинці» камери та технологіях фіксації й обробки зображень. Основний елемент будь-якої цифрової фото- або відеокамери – матриця, від якої залежить якість зображення. Матриця (іноді її називають сенсором) являє собою напівпровідникову пластину, яка вміщує велику кількість світлочутливих елементів, згрупованих у рядки і стовпці.

Проекційний апарат призначений для одержання збільшеного зображення на екрані. У проекційному апараті світло лампи, відбите ввігнутим дзеркалом, потрапляє на конденсор, що являє собою дві плоско-опуклі лінзи. Конденсор направляє паралельний пучок променів на діапозитив. Зображення діапозитива за допомогою об'єктива проектується на екран.

Око – природний оптичний прилад. Людське око (рис. 18.12) має кулясту форму діаметром близько 2,5 см. Ззовні око покрите міцною оболонкою. Передня прозора частина оболонки називається **рогівкою**.

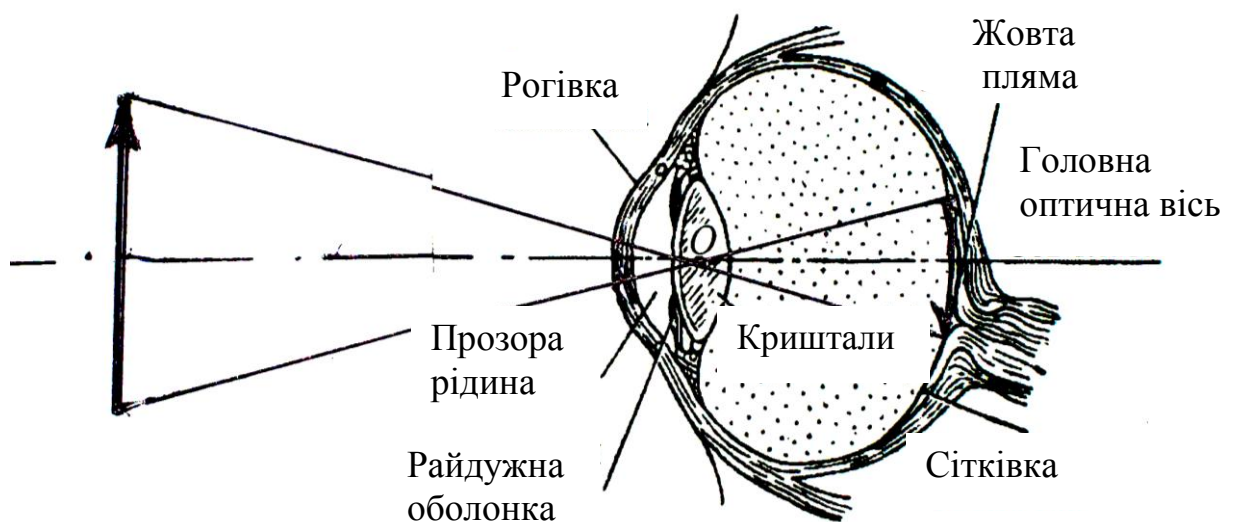


Рис. 18.12

За прозорою рогівкою перебуває райдужна оболонка, що у людей має різні кольори. Посередині райдужної оболонки є отвір – зіниця. Зіниця відіграє роль діафрагми, діаметр якої залежить від освітленості.

Простір між рогівкою і райдужною оболонкою заповнений прозорою речовиною. За райдужною оболонкою перебуває лінза – кришталик. За кришталиком внутрішня частина ока заповнена прозорою речовиною. На задній частині ока розташована сітчаста оболонка – сітківка. Сітківка складається із чутливих «датчиків» – паличок і колбочок очного нерва.

Світлові промені, що йдуть від предмета, заломлюючись у кришталіку, утворюють на сітківці дійсне, зменшене і зворотне зображення предмета. Зображення фокусується за допомогою м'яза, що деформує (змінює опуклість) кришталик. У деяких людей зображення фокусується не на сітківці, а перед нею (короткозорість) або за нею (далекозорість). Для усунення короткозорості використовують окуляри з увігнутими лінзами, а для усунення далекозорості – з опуклими.

Контрольні запитання

1. Що називається лінзою?
2. Які види лінз ви знаєте?
3. Дайте визначення фокусної відстані лінзи.
4. Який фокус називається дійсним?
5. Який фокус називається уявним?
6. Які промені вибирають для побудови зображення предмета в лінзі?
7. Побудуйте зображення предмета в увігнутій лінзі.
8. Напишіть формулу лінзи.
9. Що змінюється у формулі лінзи, якщо зображення уявне?
10. Що називається оптичною силою? Напишіть її формулу.
11. У яких одиницях вимірюється оптична сила лінзи?
12. Які оптичні прилади ви знаєте?
13. Як називається отвір у райдужній оболонці ока?
14. Що називається кришталіком?
15. Яку роль в оці виконує зіниця?
16. Що називається кутом зору?
17. Дайте визначення короткозорості.
18. Дайте визначення далекозорості.

19. ХВИЛЬОВА ОПТИКА

Хвильова оптика розглядає світлове випромінювання як електромагнітну хвилю, що поширюється у вакуумі зі швидкістю $3 \cdot 10^8$ м/с. Доказом хвильової природи світла є такі явища, як інтерференція, дифракція та поляризація.

19.1. Інтерференція світла

Інтерференцією називається явище перерозподілу інтенсивності хвиль у просторі при накладанні когерентних хвиль, у результаті якого виникає стійка картина максимумів і мінімумів інтенсивності світла.

Когерентними називаються хвилі однакової частоти, які в точках накладання мають постійну різницю фаз коливань. Явище інтерференції спостерігається за таких умов:

- *однакові частоти (довжини хвиль) коливань;*
- *постійна різниця фаз коливань;*
- *однаковий напрямок коливань.*

З повсякденного досвіду відомо, що при накладанні світла від двох лампочок інтерференція світла не спостерігається. Таким чином, світло, випромінюване незалежними джерелами, не є когерентним. Атоми випромінюють світло порціями (цугами) за дуже короткий час ($\tau \approx 10^{-8}$ с). У процесі випромінювання напрямки і початкові фази коливань змінюються хаотично.

Спостерігати інтерференцію світла можна в тому разі, якщо розділити світловий цуг від одного джерела на два і накласти ці хвилі. Хвилі будуть приходити у точки простору, маючи постійну різницю фаз.

Якщо оптична різниця ходу променів Δ чисельно дорівнює цілому числу довжин хвиль, то хвилі підсилюють одна одну.

Умова максимуму інтерференції хвиль:

$$\Delta = k\lambda = 2k \frac{\lambda}{2}, \quad (19.1)$$

де k – ціле число (0; 1; 2; 3; ...) $\Delta = n\ell$ – оптична довжина шляху; n – показник заломлення; ℓ – геометрична довжина шляху.

Умова мінімуму інтерференції хвиль:

$$\Delta = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}. \quad (19.2)$$

У природі інтерференцію світла можна спостерігати у тонких плівках бензину на поверхні води. Якщо плівка освітлюється білим світлом, то вона офарблюється в райдужні кольори. Інтерференцію світла можна спостерігати, якщо плоско-опуклу лінзу покласти опуклою стороною на рівнобіжну плоско-паралельну пластинку й освітити монохроматичним світлом, що падає нормально до поверхні лінзи. У відбитому світлі будуть помітні темні і світлі кільця (кільця Ньютона). Кільця Ньютона утворюються при накладанні світла від опуклої поверхні лінзи і верхньої поверхні пластинки.

Явище інтерференції світла широко використовується під час дуже точних вимірювань довжин світлових хвиль, розмірів, відстаней, показників заломлення, дефектів поверхні та ін.

Контрольні запитання

1. Що називають інтерференцією?
2. Які хвилі називаються когерентними?
3. Які умови спостереження інтерференції?
4. Запишіть умови максимуму інтерференції.
5. Які умови мінімуму інтерференції?
6. Що називають кільцями Ньютона?

19.2. Дифракція світла

Дифракцією називається сукупність явищ, які спостерігаються під час поширення хвиль у середовищі з неоднорідностями. Дифракцією пояснюється явище обгинання хвилями перешкод і проникнення хвиль в область геометричної тіні. Повсякденний досвід показує, що світло, яке йде від точкового джерела, дає чітку тінь. Тобто у звичайних умовах дифракція світла непомітна. Її можна спостерігати, якщо розміри отвору або екрана порівнянні з довжиною хвилі світла.

Явище дифракції просто пояснюється за допомогою принципу Гюйгенса. Згідно з цим принципом, кожна точка хвильового фронту стає джерелом вторинних сферичних хвиль. Обвідна

вторинних сферичних хвиль дає нове положення хвильового фронту у наступний момент часу.

Учений Френель доповнив принцип Гюйгенса ідеєю інтерференції вторинних хвиль: *коливання в якій-небудь точці середовища є результат накладання когерентних хвиль, що приходять від великої кількості вторинних хвиль*, тобто є результатом інтерференції вторинних хвиль. За принципом Гюйгенса-Френеля, в центрі геометричної тіні від непрозорого диска невеликого розміру завжди повинна розташовуватися світлова пляма, що й було доведено Френелем експериментально (рис. 19.1).

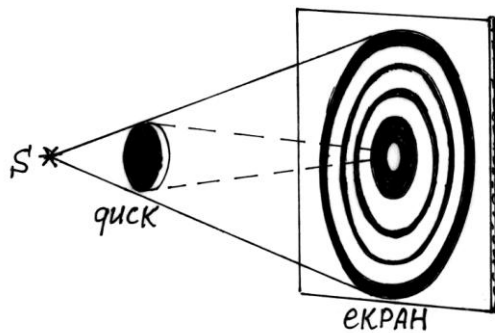


Рис.19.1

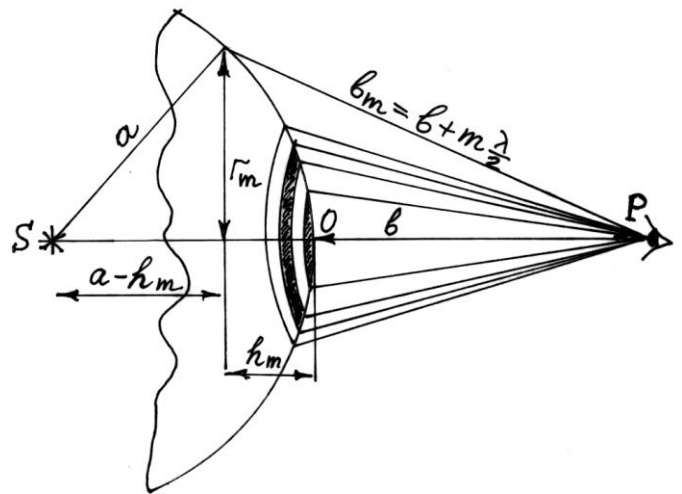


Рис.19.2

За принципом Гюйгенса-Френеля можна пояснити закон . прямолінійного поширення світла. Нехай сферична світлова хвиля розповсюджується від точкового джерела S (рис. 19.2). Побудуємо сферичний фронт хвилі радіусом $R < SP$. Амплітуда хвилі в довільній точці P залежить від результату інтерференції вторинних хвиль, які випромінюються всіма ділянками dS хвильового фронту. Френель запропонував метод розбиття хвильового фронту на зони (зони Френеля). Границею центральної (першої) зони є точки поверхні, які розміщені на відстані $b + \frac{\lambda}{2}$ від точки M

(рис. 19.2). Границі всіх зон знаходяться на відстанях $b + n \frac{\lambda}{2}$, де $n = 1; 2; 3; 4; \dots$. Коливання, які збуджуються в точці P двома сусідніми зонами, протилежні за фазою, тому що різниця ходу від

цих зон до точки P дорівнює $\frac{\lambda}{2}$. При накладанні ці коливання взаємно послаблюють одне одного. Амплітуда хвилі в довільній точці P :

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + A_5 + \dots, \quad (19.3)$$

де A_1, A_2, A_3 – амплітуди коливань, які збуджуються зонами, являють собою спадаючу арифметичну прогресію.

Розрахунки показують, що площі всіх зон Френеля однакові, а амплітуди поступово зменшуються із зростанням кута між напрямком нормалі до хвильової поверхні і напрямком на точку M . Подамо формулу (19.3) у такому вигляді:

$$A = \frac{A_1}{2} + \left(\frac{A_1}{2} - A_2 + \frac{A_3}{2} \right) + \left(\frac{A_3}{2} - A_4 + \frac{A_5}{2} \right) + \dots = \frac{A_1}{2}. \quad (19.4)$$

Усі вирази в дужках фактично дорівнюють нулю. Таким чином, амплітуда хвилі в точці P дорівнює половині амплітуди від центральної зони Френеля, радіус якої дуже малий. З великою точністю можна вважати, що світло поширюється прямолінійно.

У тому випадку, якщо світло падає на непрозорий диск, який перекриває n зон, амплітуда в центрі екрана:

$$A = \frac{A_n}{2} + \left(\frac{A_n}{2} - A_{n+1} + \frac{A_{n+2}}{2} \right) + \left(\frac{A_{n+2}}{2} - A_{n+3} + \frac{A_{n+4}}{2} \right) + \dots = \frac{A_n}{2}. \quad (19.5)$$

Амплітуда хвилі в центрі екрана дорівнює половині амплітуди від першої відкритої зони Френеля, тобто в центрі екрана завжди буде світла пляма.

Якщо світло падає на круглий отвір у непрозорому екрані, який перекриває n зон, амплітуда в центрі екрана:

$$A = \left\{ \begin{array}{l} \frac{A_1}{2} + \frac{A_m}{2} (m - \text{непарне}); \\ \frac{A_1}{2} - \frac{A_m}{2} (m - \text{парне}). \end{array} \right\} \quad (19.6)$$

Якщо світло падає на круглий отвір у непрозорому екрані, який перекриває n зон, амплітуда в центрі екрана:

$$A = \left\{ \begin{array}{l} \frac{A_1}{2} + \frac{A_m}{2} (m - \text{непарне}); \\ \frac{A_1}{2} - \frac{A_m}{2} (m - \text{парне}). \end{array} \right\} \quad (19.6)$$

У першому випадку в центрі екрана спостерігають максимум, а у другому – мінімум. Дифракція сферичних хвиль називається дифракція Френеля, а дифракція плоских хвиль – дифракція Фраунгофера. Розглянемо дифракцію плоскопаралельного пучка світла на довгій вузькій щілині.

Нехай на вузьку щілину падає паралельний пучок монохроматичного світла (рис.19.3), де b – ширина щілини; L – збираюча лінза, у фокальній площині якої розміщений екран, на якому спостерігається дифракційна картина. Щілина є частиною хвильової поверхні, кожна точка якої є центром вторинних хвиль, які поширюються за щілиною у всіх напрямках. На рис.19.3 показано вторинні хвилі, які поширюються під кутом α до напрямку падаючого пучка. Якщо різниця ходу Δ від країв щілини дорівнює $\pm k\lambda$, відкриту частину хвильової поверхні можна розбити на парне число $2k$ однакових за шириною зон, причому різниця ходу від країв кожної зони буде $\frac{\lambda}{2}$ (на рис. 19.3 $k = 2$).

Коливання від кожної пари сусідніх зон взаємно гасять один одного, тому амплітуда дорівнюватиме нулю. Умова мінімуму інтерференції при парному числі зон:

$$b \sin \alpha = \pm k\lambda, \quad k = 1; 2; 3; 4; \dots \quad (19.7)$$

Умова максимуму інтерференції при непарному числі зон:

$$b \sin \alpha = \pm(2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad k = 1; 2; 3; 4; \dots \quad (19.8)$$

Значний практичний інтерес викликає дифракція світла у системі, що складається з великої кількості паралельних щілин.

Сукупність великої кількості тонких щілин, розділених непрозорими смугами, називається дифракційною решіткою (рис. 19.4). Загальна ширина щілини і непрозорої смуги називається періодом (постійною) дифракційної решітки d . Якщо нормально до решітки направити пучок світла з довжиною хвилі λ , то промені, які ідуть під кутом φ до первісного напрямку від відповідних місць сусідніх щілин, мають оптичну різницю ходу $\Delta = d \sin \varphi$.

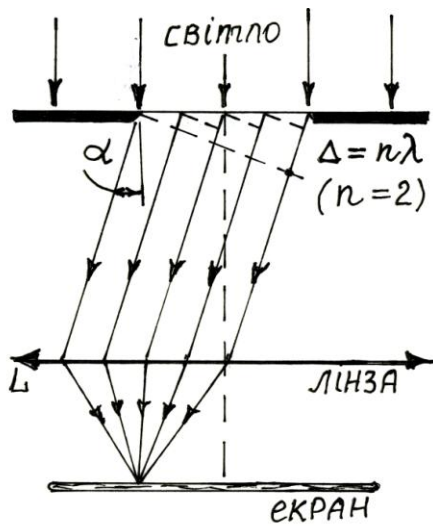


Рис. 19.3

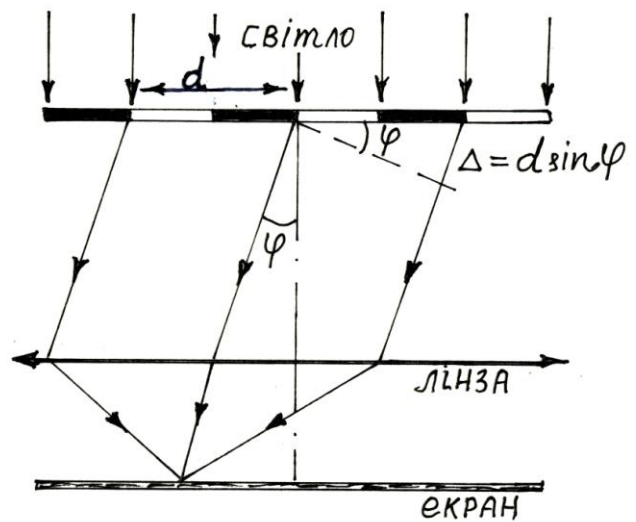


Рис. 19.4

Світло підсилюється в цьому напрямку, якщо різниця ходу дорівнює цілому числу довжин хвиль $\Delta = k\lambda$. Умова головних максимумів для дифракційної решітки:

$$d \sin \varphi = \pm k\lambda, \quad (19.7)$$

де $k = 0; 1; 2; \dots$ називається порядком дифракційного спектра.

Якщо на решітку падає біле світло, то положення максимумів для хвиль з різною довжиною хвилі відхиляються на різні кути. У результаті утвориться система дифракційних спектрів першого, другого та інших порядків. Це дозволяє використовувати дифракційні решітки з малим періодом для отримання спектрів різних речовин.

Основними характеристиками спектральних приладів є його дисперсія і роздільна сила. Дисперсія – це кутова або лінійна відстань між двома спектральними лініями, які відрізняються за довжиною хвилі на одиницю. Кутова дисперсія:

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda}, \quad (19.8)$$

де $d\varphi$ – кутова відстань між спектральними лініями, які відрізняються за довжиною хвилі на $d\lambda$. Для знаходження кутової дисперсії продиференціюємо вираз (19.7):

$$d \cos \varphi \cdot d\varphi = \pm k \cdot d\lambda. \quad (19.9)$$

Знайдемо кутову дисперсію дифракційної решітки:

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{k}{d \cos \varphi} \approx \frac{k}{d}. \quad (19.10)$$

Таким чином, кутова дисперсія обернено пропорційна періоду решітки. Лінійна дисперсія дифракційної решітки:

$$D = \frac{d\ell}{d\lambda} = f \frac{k}{d}, \quad (19.11)$$

де $d\ell$ – лінійна відстань на екрані між спектральними лініями, які відрізняються за довжиною хвилі на $d\lambda$; f – фокусна відстань лінзи.

Роздільна сила дифракційної решітки – це мінімальна різниця довжин хвиль, при якій дві лінії сприймаються в спектрі роздільно:

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} = kN, \quad (19.12)$$

де N – загальна кількість щілин решітки.

Дифракція світла спостерігається в різних середовищах з неоднорідностями розмірами порядку $0,1\lambda$. Це частинки диму, крапельки води в повітрі (туман), крапельки жиру у воді (молоко), флуктуації густини. Сильніше розсіюється короткохвильове випромінювання (фіолетові і сині промені), слабше – довгохвильове (червоне). Розсіяння світла дифракцією на неоднорідностях пояснив у 1899 р. англійський фізик Релей (1842 – 1919). За законом Релея, інтенсивність розсіяного світла пропорційна четвертому степеню частоти:

$$I_{розс} \sim \nu^4 \sim \frac{1}{\lambda^4}. \quad (19.13)$$

Законом Релея пояснюється голубий колір неба і червоний колір Сонця зранку та ввечері.

19.3. Дифракція рентгенівських променів

У 1895 р. німецький фізик В. Рентген, проводячи досліди з вакуумними двоелектродними трубками, виявив електромагнітне випромінювання з довжиною хвиль $0,1\text{--}0,001$ мкм. Це випромінювання мало велику проникну здатність, а його поглинання залежало від густини речовини.

Природа рентгенівського випромінювання була з'ясована у 1912 р., коли німецькому вченому М. Лауе вдалося спостерігати дифракцію рентгенівських променів на кристалічній решітці.

Простий метод розрахунку дифракції рентгенівських променів незалежно запропонували російський фізик Г.В. Вульф (1863 – 1925) та англійські фізики Г. і Л. Бреггі. Вони розглянули дифракцію рентгенівських променів як результат їх відбивання від паралельних кристалографічних площин, у яких лежать вузли кристалічної решітки. Різниця ходу рентгенівських променів які падають на кристалічну решітку під кутом ковзання θ , становить (рис. 19.5):

$$\Delta = 2d \sin \theta, \quad (19.13)$$

де d – відстань між атомними площинами.

Максимум інтерференції спостерігається в тому разі, якщо різниця ходу дорівнює цілому числу довжин хвиль (формула Вульфа-Брегга):

$$2d \sin \theta = k\lambda, \quad (k = 1; 2; 3; 4; \dots) \quad (19.14)$$

Рентгеноструктурний аналіз застосовується для дослідження кристалічної структури металів, сплавів, різних біологічних систем.

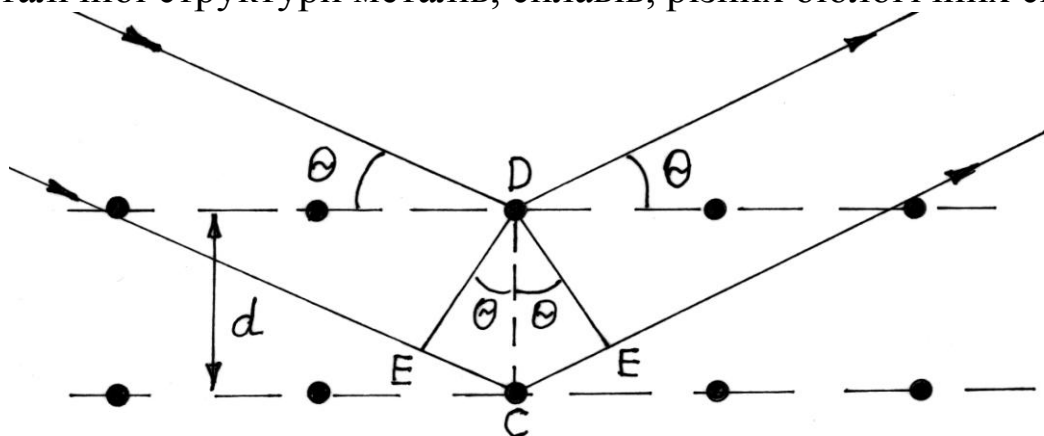


Рис.19.5

Рентгеноструктурний аналіз дозволив встановити структуру молекули ДНК, за що Дж. Уотсон і Ф. Крік були удостоєні Нобелівської премії (1962 р.).

19.4. Поняття про голографію

Голографія – метод реєстрації на фотоплівці амплітуди і фази випромінювання (ідея запропонована у 1947р. англійським фізиком Д. Габором). Фактично голограма являє собою складну дифракційну решітку. Під час запису голограми «опорна» когерентна і монохроматична хвиля від лазера після відбивання від дзеркала

падає на фотоплівку. Друга частина випромінювання лазера скеровується на предмет. Відбита від предмета сферична хвиля інтерферує з опорною хвилею і фіксується на фотоплівці. Залежно від різниці фаз кожна точка предмета утворює на фотоплівці свою голограму, тому під час опромінювання голограми опорним лазерним випромінюванням виникає об'ємне зображення предмету.

Важливим досягненням виявилася можливість запису тривимірних голограм у товстому шарі фотоемульсії за методом українського фізика Ю. Денисюка (1962 р.). Метод Денисюка дозволяє розглядати голограми при звичайному освітленні точковим джерелом світла. У наші дні голографічний метод запису зображення застосовується все ширше в мікроскопії, кіно, телебаченні, для захисту продукції від підробок та ін.

Контрольні запитання

1. Що називається дифракцією?
2. Як можна спостерігати дифракцію світла?
3. Сформулюйте принцип Гюйгенса.
4. Сформулюйте принцип Гюйгенса-Френеля.
5. Поясніть, чому світло поширюється прямолінійно?
6. Чому в центрі екрана за непрозорим диском спостерігається світла пляма?
7. Запишіть умову максимуму дифракції для щілини.
8. Що називають дифракційною решіткою?
9. Запишіть умову дифракційного максимуму для дифракційної решітки?
10. Дайте визначення кутової, лінійної дисперсії? Запишіть формули.
11. Що називають роздільною силою дифракційної решітки?
12. Сформулюйте закон Релея і запишіть його формулу
13. Запишіть формулу Вульфа-Брегга.
14. Дайте визначення голографії?

19.5. Дисперсія світла

Дисперсією світла називається явище залежності швидкості світла в речовині від частоти, тобто $v = f(\nu)$. Показник заломлення заданої речовини залежить від частоти (або

довжини хвилі), тому що абсолютний показник заломлення речовини дорівнює відношенню швидкості світла у вакуумі до

швидкості світла в речовині $n = \frac{c}{v}$:

$$n = f(\lambda). \quad (19.15)$$

Наслідок дисперсії – розкладання білого світла в спектр під час його проходження через тригранну призму (рис.19.6). Такий дослід уперше провів І. Ньютон у 1672 р. Промінь сонячного світла проходив через малий отвір у віконниці вікна, заломлювався в скляній призмі і падав на екран. Зображення отвору розтягувалося в кольорову смугу, яку Ньютон назвав спектром (від латинського слова «*spectrum*» – бачення). **Спектром називається розподіл енергії випромінювання залежно від довжини хвилі (частоти).**

Дисперсія світла в речовині пояснюється взаємодією електромагнітної хвилі з електронами, які змушені коливатися з частотою хвилі. Електрони випускають електромагнітні хвилі тієї ж частоти, які складаються з хвилею, що прийшла. Між первинною і вторинними хвилями утворюється зсув фаз, який спричинений відставанням коливань електронів. У результаті цієї взаємодії результуюча хвиля також зсунута по фазі, а швидкість її поширення залежить від частоти. Якщо частоти цих хвиль однакові, то спостерігається резонансне поглинання падаючої хвилі – речовина стає непрозорою.

З теорії коливань впливає так звана дисперсійна формула:

$$n = \sqrt{1 + \frac{k_1 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{k_2 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} + \dots}, \quad (19.16)$$

де n – показник заломлення; λ – довжина первинної хвилі; λ_1, λ_2 – довжини хвиль власних коливань електронів речовини; k – постійна величина для заданої речовини. На рис.19.7 наведено залежність показника заломлення від довжини хвилі, якщо в діелектрику наявні електрони з однією резонансною частотою λ_1 . Якщо зі збільшенням довжини хвилі показник заломлення монотонно спадає (ділянки 1–2 і 3–4), то спостерігається нормальна дисперсія $\left(\frac{dn}{d\lambda} < 0\right)$. Відмітимо, що І. Ньютон вивчав нормальну дисперсію (ділянка 3–4).

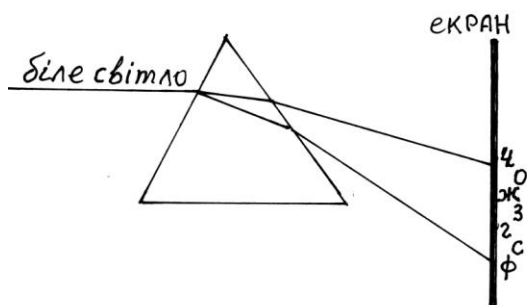


Рис.19.6

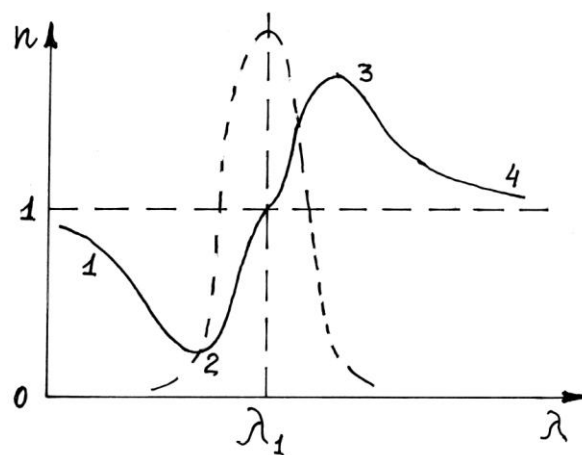


Рис.19.7

Змінюючи довжину хвилі падаючого світла, можна наблизитися до власної довжини хвилі електронів речовини ($\lambda = \lambda_1, \lambda = \lambda_2$). У області аномальної дисперсії (2–3) показник заломлення спочатку зростає, а потім різко спадає $\left(\frac{dn}{d\lambda} > 0\right)$. В області аномальної дисперсії спостерігається резонансне поглинання світла речовиною. Пунктирна крива відображає хід коефіцієнта поглинання світла речовиною. Явище дисперсії використовується для визначення сполуки речовини. **В основі спектрального аналізу лежить вивчення спектра світла, що випромінюється або поглинається речовиною.** Спектр досліджуваної речовини порівнюють зі спектром еталонної речовини. Для вивчення спектрів використовують прилади, які називаються **спектроскопами** і **спектрофотометрами**. На рис.19.8 наведено оптичну схему найпростішого спектрофотометра, у якому використовується тригранна призма або дифракційна решітка. Світло від щілини S , яка освітлена джерелом, падає на коліматор L_1 і, проходячи через нього, утворює паралельний пучок. Після заломлення в призмі пучки світла різних довжин хвиль фокусуються об'єктивом L_2 на екрані, де одержується ряд кольорових зображень щілини.

Спектр, у якому довжина хвилі змінюється безперервно, називається суцільним. **Суцільний спектр дають розпечені тверді тіла і рідина.** У спектрі білого світла умовно розрізняють сім основних кольорів: червоний, жовтогарячий, жовтий, зелений, блакитний, синій і фіолетовий. Між цими кольорами різкої межі

немає. Довжини хвиль видимого світла лежать в інтервалі довжин хвиль 0,4–0,75 мкм.

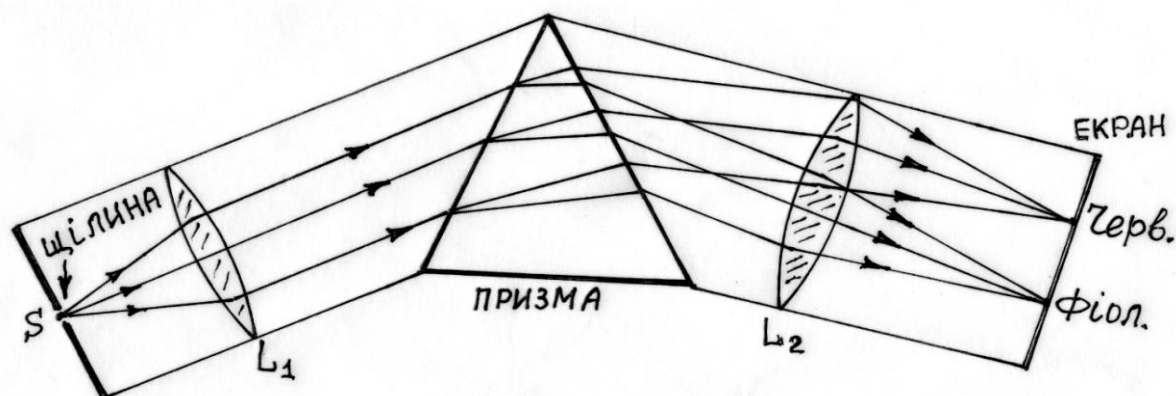


Рис19.8

Речовина в атомарному стані (у вигляді пари або газу) **випускає лінійчатий спектр**, тобто спектр, який складається з окремих кольорових смужок.

Речовина в молекулярному стані випускає смугастий спектр. Такий спектр складається з великої кількості дуже близько розташованих ліній, які зливаються в смуги, чіткі з одного краю і нечіткі з другого.

Прозора речовина частково поглинає світло, що падає на неї, і у спектрі білого світла, що пройшло цю речовину, з'являються темні лінії або смуги поглинання. Згідно із законом Кирхгофа, атоми і молекули поглинають світло тих самих довжин хвиль, які вони випускають. Спектри, які являють собою темні лінії на фоні суцільного спектра, називаються **спектрами поглинання**.

У спектральних апаратах досліджувану речовину переводять у пароподібний стан, нагріваючи в електричній дузі або опромінюючи світлом лазера. Світло від випромінюваної речовини через щілину попадає на лінзу L_1 . Пройшовши через лінзу, світло прямує до призми паралельним пучком. У призмі світловий пучок розкладається на кілька кольорових паралельних пучків. Лінза L_2 дає кольорові зображення щілини (спектр) у фокальній площині. Зображення спектра можна спостерігати на екрані або фотографувати.

Під час вивчення різних частин суцільного спектра за допомогою термопар було виявлено, що за червоним краєм спектра лежать невидимі оком **інфрачервоні промені**, а за фіолетовим – **ультрафіолетові промені**. Виявити ці промені можна, застосовуючи призму із кварцового скла.

Контрольні запитання

1. Дайте визначення дисперсії?
2. Що називають нормальною і аномальною дисперсією?
3. Що називають спектром?
4. Які речовини випускають суцільний спектр?
5. Які речовини дають лінійчатий спектр?
6. Які речовини дають смугастий спектр?
7. Що називають спектральним аналізом?

19.6. Поглинання світла. Закон Бугера-Ламберта

Під час проходження світла через речовину відбувається втрата енергії внаслідок перетворення його енергії у внутрішню енергію речовини та енергію вторинного випромінювання. Зміна інтенсивності світла на шляху dx пропорційна до величини шляху й інтенсивності (рис. 19.9):

$$dI = -\alpha I dx, \quad (19.17)$$

де α – коефіцієнт поглинання поглинаючої речовини.

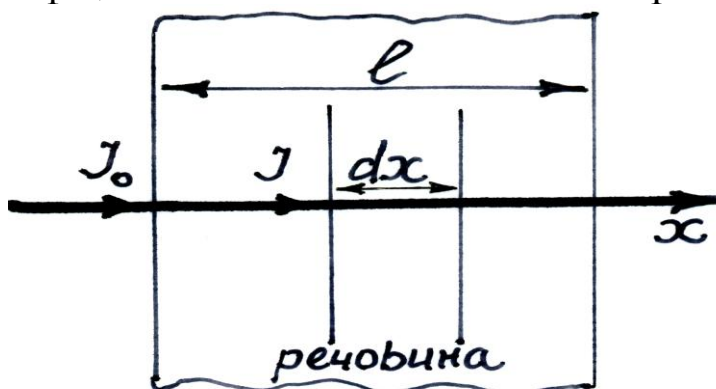


Рис.19.9

Знайдемо інтенсивність I світла, яке пройшло шар речовини товщиною l , проінтегрувавши вираз 19.17:

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -\alpha \int_0^l dx.$$

Одержимо: $\ln I - \ln I_0 = -\alpha l$,

звідки

$$I = I_0 e^{-\alpha l}. \quad (19.18)$$

Рівняння (19.18) має назву закону Бугера-Ламберта.

Відомо, що фотосинтез у листі відбувається під час поглинання світла хлорофілом і деякими іншими пігментами. У хлорофілу в видимій частині спектра є дві смуги поглинання: у червоній ділянці (660 нм) і в синьо-фіолетовій (440 нм). Відсутність поглинання світла у зеленій частині спектра зумовлює зелене забарвлення рослин.

Атмосфера у видимій ділянці спектра прозора, а, починаючи з 290 нм, стає непрозорою через поглинання озоновим шаром ультрафіолетового випромінювання з максимумом 250 нм. У цій ділянці спектра активно поглинають нуклеїнові кислоти, ароматичні амінокислоти, органічні сполуки, що приводить до руйнування клітин. Таким чином, озоновий шар оберігає все живе на Землі від згубної ультрафіолетової радіації.

19.7. Поляризація світла

У природному світлі електромагнітні хвилі накладаються і вектори напруженості електричного поля \vec{E} коливаються в різних напрямках. Однак у деяких явищах напрямок цих коливань відіграє велику роль. У цьому можна переконатися, якщо повернути телевізійну антену на 90° – зображення на екрані зникне.

Електромагнітну хвилю, у якій площини коливань векторів \vec{E} і вектора напруженості магнітного поля \vec{H} зберігають орієнтацію в просторі, називають плоскополяризованою. Під час розгляду поляризації світла всі міркування ведуться навколо «світлового» вектора \vec{E} , але потрібно пам'ятати про існування вектора \vec{H} . За допомогою спеціальних пристроїв (поляризаторів) з пучка природного світла можна виділити промінь, у якому коливання світлового вектора відбуваються в площині, яка називається *площиною коливань*. Перпендикулярна їй площина, в якій коливається вектор \vec{H} , називається *площиною поляризації*. Часткова поляризація характеризується ступенем поляризації:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (19.19)$$

де I_{\max} і I_{\min} – інтенсивності світла, що відповідають взаємно перпендикулярним компонентам вектора \vec{E} .

Якщо плоскополяризоване світло падає на поляризатор, то він пропустить тільки складову (рис. 19.9; 19.10):

$$E = E_0 \cos \varphi, \quad (19.20)$$

де φ – кут між вектором \vec{E} і площиною коливань.

Інтенсивність пропорційна квадрату амплітуди напруженості поля, тому інтенсивність світла, яке виходить з поляризатора (закон Малюса):

$$I = I_0 \cos^2 \varphi, \quad (19.21)$$

де I_0 – інтенсивність світла, яке падає на поляризатор.

При накладанні двох когерентних плоскополяризованих світлових хвиль, площини яких взаємно перпендикулярні, отримаємо еліптично поляризоване світло (якщо амплітуди хвиль однакові – світло поляризоване по колу). При різниці фаз, яка дорівнює непарному числу $0,5\pi$, і рівності амплітуд еліпс перетворюється в коло.



Рис. 19.9

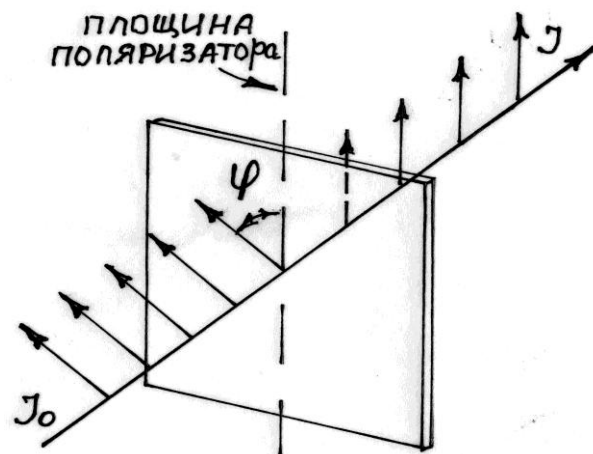


Рис. 19.10

Плоскополяризоване світло можна одержати, наприклад, пропускаючи його через кристали ісландського шпату, турмаліну або кварцу.

Пропустимо природне світло крізь дві пластинки, вирізані певним чином із кристала турмаліну (рис.19.11). Якщо повертати один з кристалів навколо осі, можна побачити, що освітленість екрана в місці перетинання зображень буде змінюватися і, при певному положенні кристалів екран, стане темним – світло не проходить. Результат цього експерименту можна пояснити так. Пройшовши крізь перший кристал (поляризатор), світло стає плоскополяризованим, а його інтенсивність зменшується у два рази

(середнє значення квадрата косинуса дорівнює 0,5). Другий кристал служить аналізатором: він майже повністю пропускає поляризоване світло тільки при певній орієнтації кристала щодо площини поляризації. Інтенсивність світла, яке пройшло скрізь поляризатор і аналізатор, така:

$$I = \frac{1}{2} I_{np} \cos^2 \varphi. \quad (19.22)$$

При повороті аналізатора на 90° поляризоване світло не проходить скрізь аналізатор.

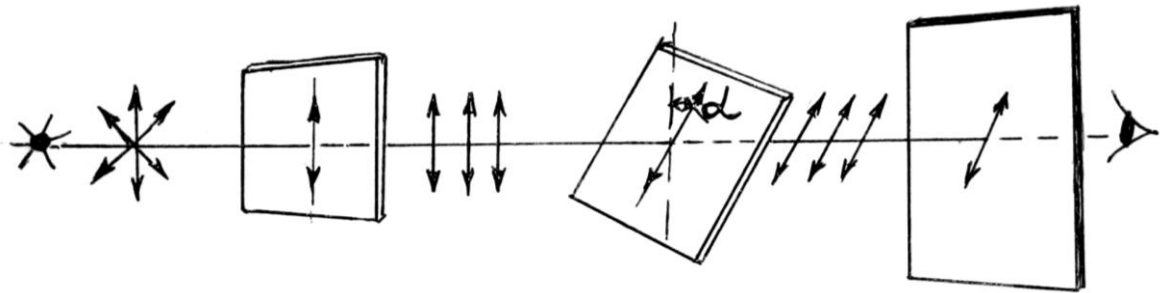


Рис. 19.11

Слід зазначити, що поздовжні хвилі не можуть бути поляризованими, тому що коливання в них відбуваються вздовж напрямку поширення хвиль.

При відбиванні і заломленні від границі двох діелектриків природне світло частково поляризується, причому у відбитому промені переважають коливання, які перпендикулярні до площини падіння, а в заломленому – паралельні до неї (рис.19.12). Це можна пояснити тим, що елементарні електричні диполі випромінюють електромагнітні хвилі перпендикулярно доелектричних моментів. Якщо кут падіння задовольняє умову:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{\sin \alpha}{\sin(90^\circ - \beta)} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha, \quad (19.23)$$

то відбитий промінь повністю поляризований (закон Брюстера).

Деякі анізотропні прозорі кристали (ісландський шпат, кварц, турмалін) мають властивість подвійного променезаломлення: під час падіння світла на кристал промінь роздвоюється на звичайний і незвичайний. Ці промені плоскополяризовані у взаємно перпендикулярних напрямках. Для незвичайного променя закони заломлення не виконуються (рис.19.13). Явище подвійного

променезаломлення пояснюється залежністю швидкості світла від напрямку коливань світлового вектора.

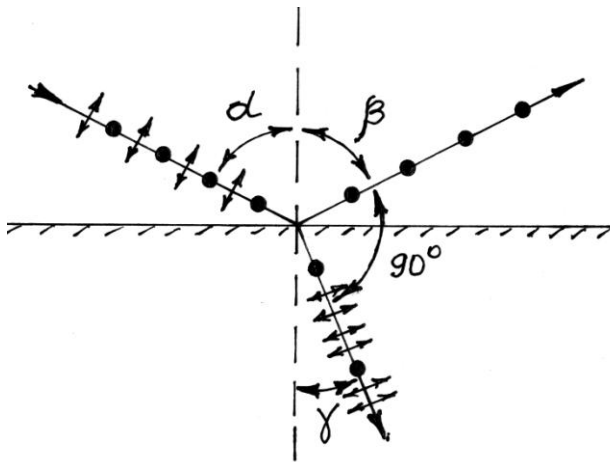


Рис.19.12

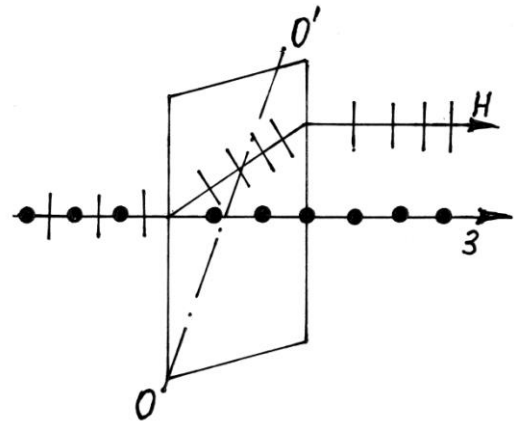


Рис. 19.13

У деяких кристалах один з променів поглинається дужче від другого. Це явище має назву **дихроїзм**. У ролі поляризатора або аналізатора часто використовують **поляроїд** – целулоїдну плівку, в яку вводять велику кількість однаково орієнтованих дрібних кристаликів сульфату йодистого хініну.

Оптично ізотропні речовини стають оптично анізотропними під дією одностороннього стиску або розтягу, електричного (ефект Керра) або магнітного поля.

Поляризоване світло широко застосовується в наукових дослідженнях і в сучасній техніці. Так, під час біологічних досліджень використовують поляризаційний мікроскоп.

Під час проходження поляризованого світла через деякі речовини (кварц, скипидар, розчини цукру та ін.) спостерігається повертання площини коливань світлового вектора (площини поляризації). Кут повороту площини поляризації у твердих тілах пропорційний до шляху, який проходить промінь у кристалі:

$$\varphi = \alpha \cdot \ell, \quad (19.24)$$

де α – питома постійна обертання.

Кут повороту площини поляризації у розчині пропорційний до шляху, який проходить промінь у розчині, і концентрації активної речовини C :

$$\varphi = \alpha \cdot C \cdot \ell. \quad (19.25)$$

Штучне повертання площини поляризації можна викликати в електричному (ефект Керра) і магнітному полі (ефект Фарадея).

Контрольні запитання

1. Які хвилі називаються поляризованими?
2. Як у природному світлі коливається вектор напруженості?
3. Сформулюйте і запишіть формулу закону Малюса.
4. Які способи одержання поляризованого світла ви знаєте?
5. Що називається поляризатором? Що таке аналізатор?
6. Що називається площиною поляризації?
7. Запишіть формулу закону Малюса.
8. Доказом чого служить явище поляризації світла?

20. КВАНТОВА ПРИРОДА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

20.1. Теплове випромінювання та його характеристики

Поява квантової фізики пов'язана з проблемою вивчення теплового випромінювання. Наприкінці XIX ст. стало зрозуміло, що теплове, видиме й ультрафіолетове випромінювання випускаються атомами. З класичної електродинаміки Максвелла випливало, що будь-який заряд, який перебуває у коливальному (обертальному) русі, повинен випромінювати електромагнітні хвилі і поступово втрачати енергію.

Відомо, що тіла випромінюють світло за рахунок: хімічної (хемілюмінесценція), електричної (електролюмінесценція), світлової (фотолюмінесценція), внутрішньої енергії (теплове випромінювання).

Нагріті тверді тіла та рідина випромінюють біле світло (дають суцільний спектр) за рахунок енергії теплового руху атомів та молекул. Під час охолодження змінюються не тільки інтенсивність, але й спектральний склад випромінювання (колір нагрітого тіла змінюється від біло-голубого до темно-червоного).

Теплове випромінювання – це явище випромінювання світла за рахунок внутрішньої енергії тіл. Теплове випромінювання відбувається при будь-якій температурі, однак при низьких температурах випромінюються більш довгі (інфрачервоні) електромагнітні хвилі.

Теплове випромінювання – єдиний вид випромінювання, який може бути у рівновазі з випромінюючим тілом.

Припустимо, що нагріте тіло розміщене в порожнині, стінки якої ідеально відбивають електромагнітне випромінювання (рис.20.1). Унаслідок безперервного обміну енергією через деякий час настане рівновага між тілом та випромінюванням. Дійсно, якщо тіло випромінюватиме більше, ніж поглинатиме, то воно охолоне до абсолютного нуля. Всі інші види випромінювання нерівноважні.

Для кількісної оцінки випромінювання використовують такі характеристики. Основна світлова характеристика в СІ – сила світла. Одиниця сили світла кандела (у перекладі з латинської мови «свічка») являє собою силу світла в заданому напрямку від джерела, що випромінює монохроматичне випромінювання частотою $5,4 \cdot 10^{14}$ Гц, енергетична сила світла якого в цьому напрямку дорівнює 1,683 Вт на стерadian (тілесний кут $\Delta\Omega = \Delta S/R^2$ вимірюється у стерadianах, ср).

Світловий потік Φ – потужність випромінювання (Bm), яка поширюється усередині тілесного кута. Світловий потік $d\Phi$ джерела із силою світла I в елементарному тілесному куті $d\Omega$:

$$d\Phi = Id\Omega. \quad (20.1)$$

Розподіл потужності випромінювання характеризується спектральною густиною випромінювання – це потужність випромінювання в усіх напрямках з одиниці площі поверхні тіла в інтервалі частот (довжин хвиль) одиничної ширині:

$$r_{\omega T} = \frac{dR_{\omega}}{d\omega}; \quad r_{\lambda T} = \frac{dR_{\lambda}}{d\lambda}, \quad (20.2)$$

де dR_{ω} (dR_{λ}) – потік енергії, який випромінюється з кожного квадратного метра поверхні в інтервалі тілесних кутів 2π ср в інтервалі частот від ω до $\omega + d\omega$ або в інтервалі довжин хвиль від λ до $\lambda + d\lambda$ ($Bm \cdot c/m^2$). Потік енергії залежить від ширини інтервалу частот або інтервалу довжин хвиль:

$$dR_{\omega} = r_{\omega T} d\omega; \quad dR_{\lambda} = r_{\lambda T} d\lambda. \quad (20.3)$$

Інтегральна густина випромінювання (енергетична світність) $R(T)$ – потік енергії випромінювання різних частот (від 0 до ∞), який випромінюється з одиниці поверхні у всіх напрямках (у тілесному куті 2π ср). Одиниця вимірювання – Bm/m^2 . Енергетичну світність можна підрахувати, підсумувавши за всіма частотами:

$$R(T) = \int_0^{\infty} r_{\omega T} d\omega ; R(T) = \int_0^{\infty} r_{\lambda T} d\lambda. \quad (20.4)$$

Спектральна поглинальна спроможність $a_{\omega T}$ – це фізична величина, яка дорівнює відношенню потоку енергії заданої частоти, поглиненого тілом, до потоку енергії, що падає:

$$a_{\omega} = \frac{d\Phi_n}{d\Phi}. \quad (20.5)$$

20.2. Закони теплового випромінювання

Учений Кіргоф установив кількісний зв'язок між випромінюючою та поглинальною спроможностями тіл. Якщо декілька різних тіл помістити у порожнині з дзеркальними стінками, то через деякий час настане теплова рівновага (другий закон термодинаміки). Це можливо тільки в тому випадку, коли тіла, які більше випромінюють – більше поглинають. Закон Кірхгофа стверджує:

відношення спектральної густини випромінювання до спектральної поглинальної спроможності не залежить від природи та форми тіл і являє собою універсальну функцію частоти та температури:

$$\frac{r_{\omega T}}{a_{\omega T}} = f(\omega, T). \quad (20.6)$$

Тіло, яке повністю поглинає випромінювання при будь-якій температурі, називається абсолютно чорним. Абсолютно чорних тіл у природі немає. Сажа, платинова чернь у деякому інтервалі частот наближається до них. Ідеальна модель абсолютно чорного тіла (АЧТ) являє собою невеликий отвір у порожнині із зачорненою внутрішньою поверхнею (рис. 20.1, 20.2). Для АЧТ $a_{\omega T} = 1$, тому універсальна функція Кірхгофа для АЧТ являє собою спектральну густину випромінювання:

$$r_{\omega T} = f(\omega, T) \quad (20.7)$$

Для кількісного опису теплового випромінювання потрібно було знайти цю функцію. Австрійські фізики Й. Стефан (у 1879 р.) і Л. Больцман (у 1884 р.) для вирішенні цієї задачі розглянули рівноважне теплове випромінювання у порожнині як термо-

динамічну систему і застосували перший та другий закони термодинаміки. Вони показали (закон Стефана-Больцмана), що

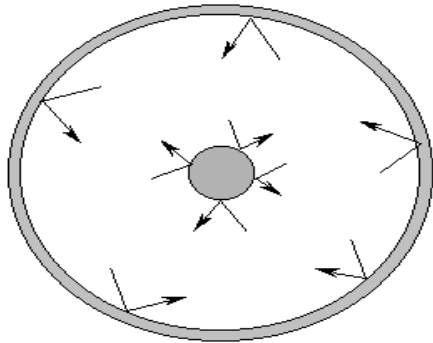


Рис. 20.1

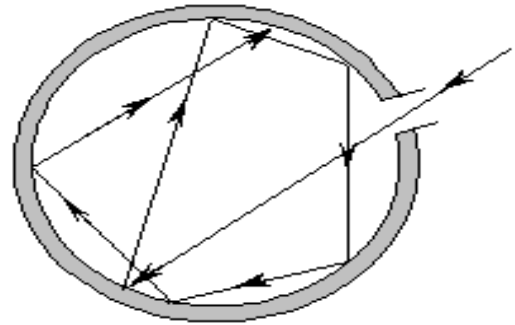


Рис. 20.2

інтегральна густина випромінювання абсолютно чорного тіла пропорційна четвертому степеню його абсолютної температури:

$$R = \sigma T^4, \quad (20.8)$$

де $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$ – стала Стефана-Больцмана.

Інтегральна густина випромінювання реального (сірого) тіла:

$$R = \alpha \cdot \sigma T^4, \quad (20.8)$$

де α – коефіцієнт, який визначає випромінюючу здатність тіла (коефіцієнт «сірості»).

Для абсолютно чорного тіла $\alpha = 1$, розжареної вольфрамової проволочки $\alpha = 0,34$, сухого ґрунту $\alpha = 0,15-0,30$.

Німецький фізик В. Він розглянув процес адіабатичного стискування рівноважного теплового випромінювання в циліндрі з абсолютно чорними стінками. Базуючись на законах термодинаміки та електромагнітної теорії світла, він знайшов, що *універсальна функція Кірхгофа пропорційна кубу частоти і являється функцією відношення частоти до температури:*

$$f(\omega, T) = \omega^3 \cdot F\left(\frac{\omega}{T}\right). \quad (20.9)$$

Пізніше виявилось, що формула описує розподіл енергії в спектрі АЧТ тільки для великих значень відношення $\frac{\omega}{T}$, тобто правильна для коротких хвиль і дає велику розбіжність з дослідом в області довгих хвиль.

Якщо похідну від функції Віна по ω прирівняти до нуля, можна знайти довжину хвилі λ_{max} , яка відповідає максимальному

значенню спектральної густини випромінювання (закон зміщення Віна):

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (20.10)$$

де $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ мкмК}$ – стала Віна.

Згідно із законом зміщення Віна, λ_{\max} обернено пропорційна термодинамічній температурі тіла.

Для знаходження універсальної функції Кірхгофа англійські вчені Д. Релей і Д. Джинс, крім вищерозглянутих, застосували також методи статистичної фізики. Вони розглянули рівноважне теплове випромінювання як стоячі хвилі у порожнині із дзеркальними стінками (рис. 20.3). Кожному елементарному випромінювачу (осцилятору) на основі закону рівного розподілу енергії за ступенями вільності вони приписали енергію $u(\omega, T) = kT$ ($kT/2$ – електрична енергія та $kT/2$ – магнітна енергія). Універсальна функція Кірхгофа за Релеєм і Джинсом:

$$f(\omega, T) = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} kT, \quad (20.11)$$

де c – швидкість світла у вакуумі.

Експериментальна перевірка показала, що залежність спектральної густини випромінювання від довжини хвилі показана на рис. 20.4. Закон Релея-Джинса підтверджує дані експериментів тільки при великих довжинах хвиль і зовсім не придатний для коротких. Застосування формули Релея-Джинса до виводу закону Стефана-Больцмана приводить до абсурду: більша частина енергії випромінювання повинна припадати на ультрафіолетову частину спектра. Цей результат отримав назву «ультрафіолетова катастрофа».

Видатні вчені Кирхгоф, Стефан, Больцман, Він, Релей, Джинс сформулювали ряд законів випромінювання, однак пояснити розподіл енергії в спектрі абсолютно чорного тіла методами класичної теорії їм не вдалося.

20.3. Квантова гіпотеза і формула Планка

У 1900 р. німецький учений Макс Планк висунув гіпотезу, що *атоми випромінюють не безупинно, а порціями – квантами, енергія яких пропорційна частоті коливань:*

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (20.12)$$

де E – енергія кванта, ν – частота, c – швидкість світла, λ – довжина хвилі, h – стала, котру назвали сталою Планка. Її чисельне значення: $h = 6,6260755 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Використовуючи статистичні методи Планк довів, що середня енергія осцилятора становить:

$$u_{\omega, T} = \frac{\hbar\omega}{e^{kT} - 1}, \quad (20.13)$$

де $\hbar = \frac{h}{2\pi}$.

Для універсальної функції Кірхгофа Планк одержав вираз:

$$f_{\omega, T} = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} \cdot \frac{\hbar\omega}{e^{kT} - 1}. \quad (20.14)$$

Формула Планка блискуче узгоджувалася з експериментальними результатами щодо розподілу енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла на всьому інтервалі частот при всіх температурах (рис. 20.4).

З формули Планка можна отримати, як частинні випадки, всі закони теплового випромінювання. Таким чином, ця формула вирішила проблему теплового випромінювання.

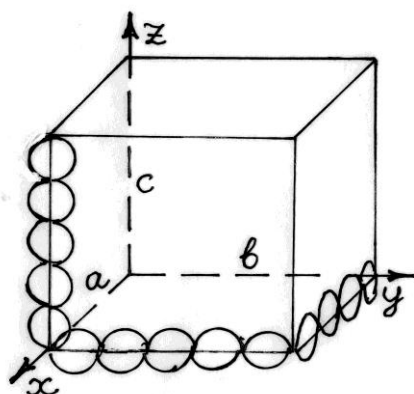


Рис. 20.3

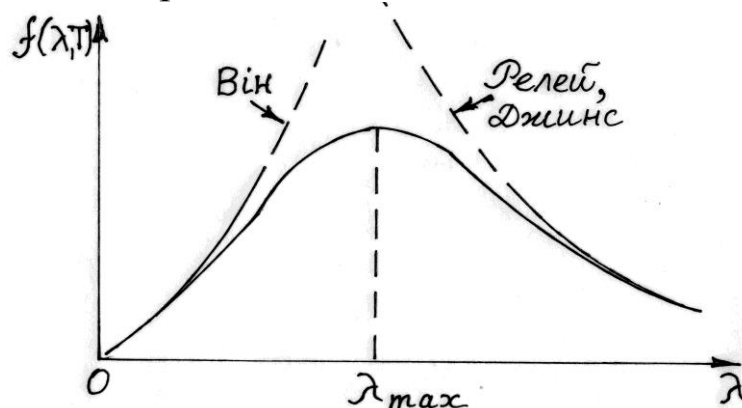


Рис. 20.4

20.4. Джерела світла. Оптична пірометрія

Потік сонячної радіації, який припадає на 1 м^2 площі поверхні земної атмосфери, становить $1,35\text{ кВт}$. Ця величина називається сонячною постійною. За найбільш сприятливих умов на 1 м^2 поверхні Землі падає потік сонячної радіації не більше $1,12\text{ кВт}$.

Земна атмосфера послаблює сонячну радіацію і змінює її спектр. Інтенсивність сонячної радіації вимірюють актинометром, принцип дії якого базується на використанні різниці температури темних і світлих поверхонь тіла під впливом сонячної радіації.

Око людини має чутливість до вузької ділянки спектру ($380\text{--}770\text{ нм}$), а його максимальна чутливість відповідає довжині хвилі $\lambda = 555\text{ нм}$, тобто найбільш вигідне теплове джерело світла повинно мати температуру 5200 К . Розрахунок показує, що при температурі більшості існуючих джерел світла $3000\text{--}3200\text{ К}$ ККД становить $4\text{--}5\%$. Джерела світла на основі напівпровідникових світлових діодів мають більш високий ККД.

Закони теплового випромінювання дають змогу визначити температуру будь-якого тіла, якщо відома інтегральна густина випромінювання, або довжина хвилі λ_{max} , яка відповідає її максимальному значенню. Методи визначення температури за тепловим випромінюванням називаються *оптичною пірометрією*.

За законом зміщення Віна визначають температуру поверхні Сонця, зірок, розплавленого металу. Дія радіаційних пірометрів базується на вимірюванні інтегральної густини випромінювання тіла й обчисленні його температури за законом Стефана-Больцмана.

Змії й комахи сприймають інтегральну густина випромінювання, яку створюють біологічні теплокровні тварини. Змія кидається на жертву, коли температура мембрани лицевої ямки підвищується всього на $0,003\text{ К}$.

Яскравісний метод визначення температури базується на візуальному порівнянні яскравості розжареної нитки лампи пірометра з яскравістю зображення розжареного досліджуваного тіла.

20.5. Квантова теорія випромінювання Ейнштейна. Фотоелектричний ефект

Спочатку значення гіпотези Планка для фізики в 1900 р. не було зрозумілим навіть великим ученим. Тільки *А. Ейнштейн побачив у кванті реально існуючу частку електромагнітного поля – фотон*. Фотон існує лише в русі, зупинити фотон не можна, він або рухається зі швидкістю світла у вакуумі, або не існує. За законом Ейнштейна про пропорційність маси та енергії, фотон повинен мати електродинамічну масу:

$$m_{\phi} = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}. \quad (20.15)$$

Маса спокою у нього дорівнює нулю, але фотон рухається, тому він має імпульс:

$$p = m_{\phi}c = \frac{h \cdot \nu}{c} = 2\pi\hbar \cdot \frac{\omega}{2\pi \cdot c}; \quad \vec{p} = \hbar\vec{k}. \quad (20.16)$$

За теорією Ейнштейна, світло випромінюється, розповсюджується і поглинається квантами. Свою теорію учений застосував для пояснення явища фотоелектричного ефекту.

Зовнішнім фотоефектом називається явище виривання електронів з металу під дією світла. Фотоефект був відкритий Генріхом Герцом у 1887 р. під час вивчення електричної дуги. Докладно явище було досліджено А.Г. Столетовим у 1887 р. На рис. 20.5 наведено схему установки, за допомогою якої він вивчав явище фотоефекту. Перед ретельно очищеною цинковою пластинкою містилася металева сітка, через яку пластинка висвітлювалася світлом від електричної дуги. Якщо пластинку з'єднати з негативним полюсом джерела струму, то в колі виникає

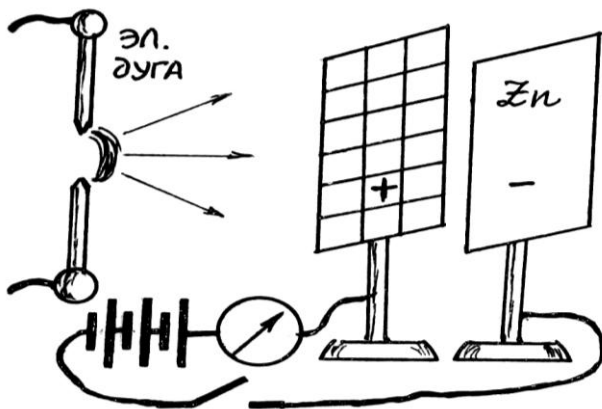


Рис. 20.5

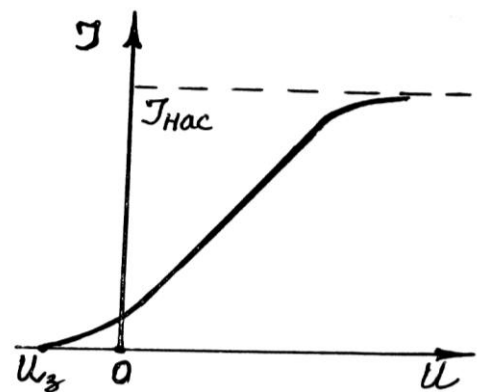


Рис. 20.6

струм, який можна виміряти гальванометром. Якщо пластинку з'єднати з позитивним полюсом, то при напрузі більше декількох вольтів струм не виникає.

Саме Столетов виявив, що струм виникає одночасно з висвітленням фотокатода (цинкової пластинки) для світла, довжина хвилі якого менша від деякої мінімальної величини. Ця мінімальна довжина хвилі одержала назву «червона границя фотоелектричного ефекту». На рис. 20.6 наведена вольт-амперна характеристика фотоелектричного ефекту. Видно, що фотоелектричний ефект спостерігається навіть при невеликому позитивному потенціалі на цинковій пластинці (фотокатоді). Пізніше були встановлені всі три закони фотоелектричного ефекту:

- сила струму насичення прямо пропорційна світловому потоку;
- швидкість електронів, що вилітають, залежить від частоти (довжини хвилі) світла й не залежить від світлового потоку;
- фотоелектричний ефект спостерігається під час опромінення світлом із частотою, більшою від критичної.

За теорією Ейнштейна, енергія поглиненого кванта світла (фотона) іде на здійснення роботи виходу із заданого металу й одержання електроном кінетичної енергії. **Рівняння Ейнштейна (закон збереження енергії при фотоелектричному ефекті):**

$$h\nu = A + W_{\text{кін}}, \quad (20.17)$$

де h – стала Планка; ν – частота світла; A – робота виходу електрона з металу; $W_{\text{кін}} = \frac{m\mathcal{G}^2}{2}$ – кінетична енергія електрона.

Критичну довжину хвилі світла, що відповідає червоній границі фотоелектричного ефекту, можна знайти з рівняння Ейнштейна, якщо прийняти, що кінетична енергія електрона дорівнює нулю:

$$\lambda_{\text{кр}} = \frac{hc}{A}. \quad (20.18)$$

Вакуумний фотоелемент являє собою скляний балон, частина внутрішньої поверхні якого покрита шаром речовини (фотокатод) з малою роботою виходу. У центрі балона розташована металева петля, що служить анодом. Якщо між анодом і фотокатодом прикласти різницю потенціалів і опромінювати світлом, то в електричному ланцюзі піде струм. Для збільшення сили струму іноді балон заповнюють інертним газом.

Пізніше в напівпровідниках був виявлений внутрішній фотоелектричний ефект. Він відбувається в результаті переходів електронів між енергетичними рівнями в кристалах під час поглинання фотонів. Внутрішній фотоелектричний ефект використовується у напівпровідникових фотоелементах, які перетворюють енергію випромінювання в електричний струм.

Фотоелементи і прилади на їхній основі широко використовуються в науці і техніці для контролю технологічних процесів, запису телевізійного зображення, перетворення сонячної енергії в електричну тощо.

20.6. Короткохвильова границя гальмового рентгенівського випромінювання

Квантова природа випромінювання підтверджується існуванням короткохвильової границі гальмового рентгенівського випромінювання. Відомо, що рентгенівські промені виникають під час гальмування швидких заряджених частинок (електронів, іонів) у твердих тілах. На рис. 20.7 зображені експериментальні залежності розподілу потужності рентгенівського випромінювання

$\frac{dP}{d\lambda}$ від довжини хвилі для різних значень прискорювальної напруги U . Пояснити існування короткохвильової границі λ_{\min} можна тільки тим, що енергія рентгенівського фотону не може бути менша від кінетичної енергії зарядженої частинки:

$$eU \geq \frac{hc}{\lambda}; \quad \lambda_{\min} = \frac{hc}{eU} = \frac{12400}{U} \quad (20.19)$$

20.7. Ефект Комптона

Корпускулярні властивості випромінювання особливо виявляються в ефекті, який був відкритий американським фізиком А. Комптоном у 1923 р. Комптон вивчав розсіяння монохроматичного рентгенівського випромінювання речовиною. Він знайшов, що у розсіяному випромінюванні поряд з первісним спостерігається випромінювання з більшими довжинами хвиль. Зміщення довжини хвилі розсіяного рентгенівського випромінювання описується формулою:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_c(1 - \cos\theta) \quad (20.20)$$

де λ – первісна довжина хвилі; λ' – довжина хвилі розсіяного випромінювання; λ_c – комптонівська довжина хвилі (для електрона $\lambda_c = 9,43 \cdot 10^{-8} \text{ м}$); θ – кут розсіяння.

Єдине пояснення ефекту Комптона полягає в розсіянні рентгенівських фотонів (енергія світлових фотонів порядку енергії зв'язку електронів з атомом) на вільних електронах (рис. 20.8).

Під час розсіяння фотона з енергією $\hbar\omega$ на електроні виконуються закони збереження повної енергії та імпульсу:

$$\hbar\omega + mc^2 = \hbar\omega' + c\sqrt{p^2 + m^2c^2}; \quad (20.21)$$

$$\hbar\vec{k} = \vec{p} + \hbar\vec{k}', \quad (20.22)$$

де ω' – частота розсіяного фотону; \vec{p} – імпульс розсіяного електрона; \vec{k}, \vec{k}' – хвильові вектори; c – швидкість світла у вакуумі.

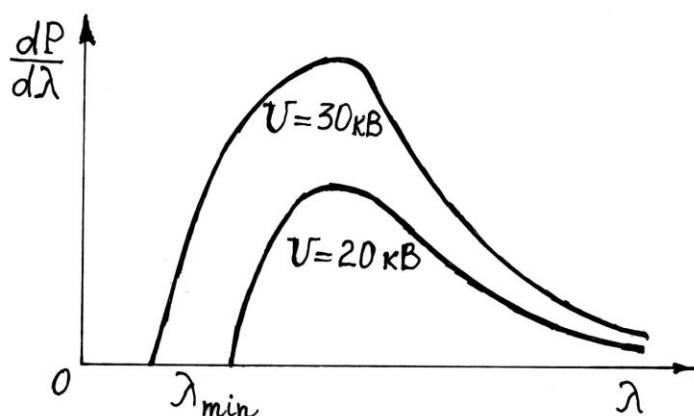


Рис. 20.7

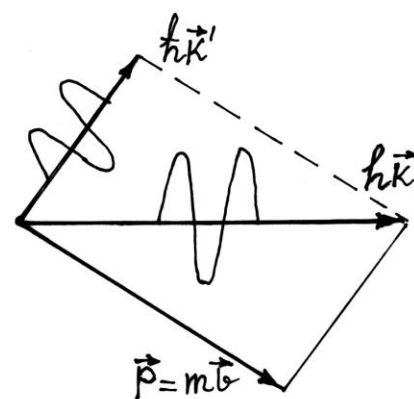


Рис. 20.8

Роз'язавши систему рівнянь (20.21) та (20.22), можна знайти зміщення довжини хвилі $\Delta\lambda$ залежно від кута розсіяння:

$$\Delta\lambda = \frac{2\pi\hbar}{mc}(1 - \cos\theta), \quad (20.23)$$

де $2\pi\hbar \frac{2\pi\hbar}{mc} = \lambda_c$ – комптонівська довжина хвилі.

20.8. Квантове та хвильове пояснення тиску світла. Дуалізм електромагнітного випромінювання

З наявності у фотона імпульса випливає, що світло має чинити тиск, який дорівнює імпульсові, який передається фотонами одиниці поверхні за одиницю часу. Якщо врахувати, що частина фотонів ρ відбивається, то для тиску одержимо формулу:

$$p = 1 + \rho \cdot \frac{\varepsilon}{c} N = (1 + \rho) \cdot \omega_{em}, \quad (20.24)$$

де ε – енергія фотона; N – кількість фотонів, що падають на одиницю поверхні за одиницю часу; ρ – коефіцієнт відбивання; c – швидкість світла; ω_{em} – середня густина енергії.

Електромагнітна теорія Максвелла (1873 р.) також передбачає, що світло чинить тиск:

$$p = (1 + \rho) \cdot \omega_{em}, \quad (20.25)$$

$$\text{де } \omega_{em} = n \cdot \varepsilon = \frac{N\varepsilon}{c}.$$

Експериментально тиск світла на тверді тіла (1900 р.) та газу (1910 р.) виміряв і довів П. Н. Лебедев. Тиск світла однаково пояснюється і хвильовою і квантовою теорією.

Більша група явищ: інтерференція, дифракція, поляризація та інші свідчить про те, що світло – електромагнітна хвиля. У таких явищах, як випромінювання абсолютно чорного тіла, фотоефект, ефект Комптона та інших проявляються квантові властивості.

Світло одночасно володіє і корпускулярними і хвильовими властивостями. Таким чином, електромагнітне випромінювання демонструє єдність безперервних та дискретних властивостей. Відзначимо, що квантові властивості посилюються зі зростанням частоти, тобто зі зменшенням довжини хвилі (табл. 20.1).

Всі спостережувані оптичні явища доводять, що при проходженні фотонів через оптичну систему відбувається перерозподіл фотонів у просторі і може виникати дифракційна картина. ***Хвильові і корпускулярні властивості електромагнітного випромінювання не виключають, а доповнюють один одного.***

Шкала електромагнітних хвиль

| Назва випромінювання | Частота, Гц | Властивості |
|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| Змінний струм | $5 \cdot 10^1$ | Хвильові |
| Струм високої частоти | $4 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^4$ | Хвильові |
| Довгі та середні радіохвилі | $2 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^6$ | Хвильові |
| Короткі радіохвилі | $3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$ | Хвильові |
| Метрові радіохвилі | $3 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^8$ | Хвильові |
| Дециметрові радіохвилі | $3 \cdot 10^8 - 3 \cdot 10^9$ | Хвильові |
| Сантиметрові радіохвилі | $3 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{10}$ | Хвильові |
| Міліметрові радіохвилі | $3 \cdot 10^{10} - 3 \cdot 10^{11}$ | Хвильові |
| Інфрачервоне випромінювання | $3 \cdot 10^{11} - 4 \cdot 10^{14}$ | Хвильові та квантові |
| Видиме випромінювання | $4 \cdot 10^{11} - 8 \cdot 10^{14}$ | Хвильові та квантові |
| Ультрафіолетове випромінювання | $8 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16}$ | Хвильові та квантові |
| Рентгенівське випромінювання | $3 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{20}$ | Хвильові та квантові |
| Гамма-випромінювання | $> 3 \cdot 10^{20}$ | Квантові |

Контрольні запитання

1. Що називають зовнішнім фотоелементом?
2. Сформулюйте закони фотоелементу?
3. Запишіть рівняння Ейнштейна для фотоелементу.
4. Що називають червоною границею фотоелементу?
5. Що називають фотоелементом?
6. Чому дорівнює короткохвильова границя рентгенівського спектра?
7. Що називають ефектом Комптона?
8. Чому дорівнює тиск світла?
9. Які явища є доказом хвильової природи світла?
10. Які явища доводять квантову природу світла?

21. АТОМНА ФІЗИКА

21.1. Складна будова атома

Дві тисячі років тому з'явилася гіпотеза про те, що речовина складається з атомів – дрібних частинок, які не можна розкласти на більш дрібні складові. Вивчення електричних струмів у металах, електролітах і газах, відкриття рентгенівських променів, радіоактивності, а також першої відомої елементарної частинки – електрона – показали, що атоми мають складну внутрішню структуру.

Перша модель атома була запропонована Дж. Дж. Томсоном у 1903 р. У моделі Томсона атом являє собою кулю радіусом приблизно 10^{-10} м, у якій рівномірно розподілений позитивний електричний заряд. Усередині кулі перебувають електрони, які перебувають у коливальному русі. Електрони, що коливаються, збуджують електромагнітне випромінювання атома.

21.2. Досліди Резерфорда з розсіювання α -частинок

Значну роль у розвитку знань про будову атома відіграли досліди з розсіювання ядер атома гелію (α -частинок) тонкою золотою фольгою, які були проведені Резерфордом, Гейгером і Марсденом у 1911 р. У свинцевий ящик з невеликим отвором вчені помістили шматочок уранової руди, що випускала α -частинки (рис. 20.1, а). На шляху α -частинок вони розмістили фольгу. Під час проходження через фольгу α -частинки відхилялися на різні кути θ і потрапляли на екран, покритий флуоресціюючою речовиною. За допомогою мікроскопа вони спостерігали місця влучення α -частинок по світінню (сцинтиляціях) екрана. Виявилось, що α -частинки відхилялися як на невеликі кути, так і на кути $130\text{--}180^\circ$ (рис. 21.1). На підставі цих експериментів Резерфорд запропонував ядерну модель атома:

- *атом складається з ядра, у якому зосереджений весь позитивний заряд ядра $+Ze$ і фактично вся маса атома. Лінійні розміри ядра $\approx 10^{-15}$ м;*

- *навколо ядра в області діаметром $\approx 10^{-10}$ м по замкнутих орбітах обертаються Z електронів, утворюючи електронну оболонку атома.*

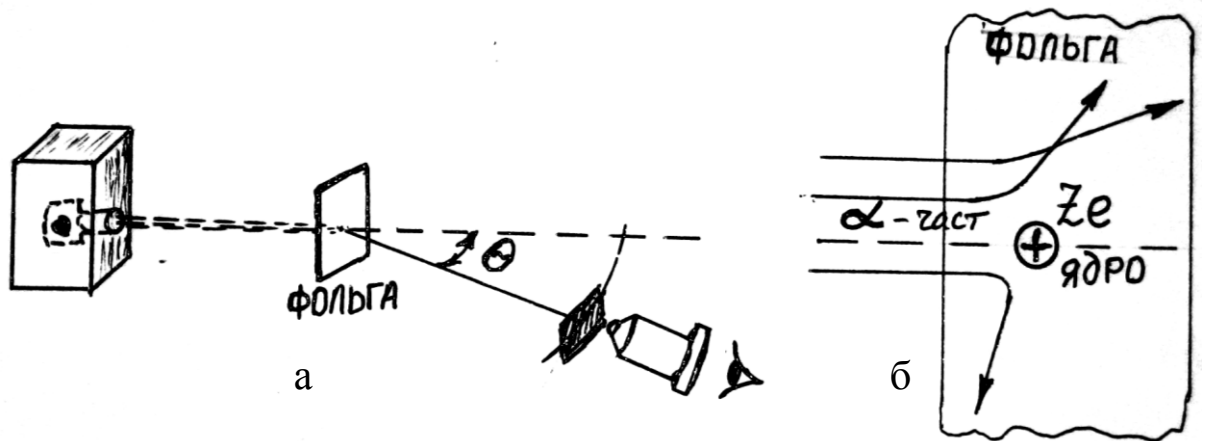


Рис. 21.1

Ядерна модель атома Резерфорда нагадувала Сонячну систему. Тому модель назвали планетарною. Згідно з електромагнітною теорією Максвелла, електрон, який обертається навколо ядра з нормальним прискоренням $a_n = \frac{v^2}{R}$, повинен випромінювати електромагнітні хвилі, втрачати енергію і, зрештою, впасти на ядро. Отже, відповіді на питання про стійкість атома модель Резерфорда не давала.

21.3. Теорія воднеподібного атома за Бором

У 1913 р. датський учений Нільс Бор зв'язав ядерну модель Резерфорда з квантовим характером випромінювання атома. Ключем до розшифровки будови атома стала робота швейцарського фізика Бальмера, що в 1885 р. встановив, що довжини хвиль, відомих у той час спектральних ліній атома водню у видимій частині спектра, описуються простою формулою (формулою Бальмера):

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (21.1)$$

де $R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ - стала Ридберга; $n = 2$; $m = 3; 4; 5; 6$.

Пізніше в спектрі атома водню були виявлені ще декілька спектральних серій в ультрафіолетовій $n = 1$ (серія Лаймана) і інфрачервоній $n = 3$ (серія Пашена); $n = 4$ (серія Брекета); $n = 5$

(серія Пфунда), які також описуються узагальненою формулою Бальмера ($m = n + 1$).

Під час розрахунків енергії атома Н. Бор виходив з уявлення, що, згідно з теорії М. Планка, атом випромінює енергію порціями (квантами), тобто його енергія дорівнює цілому числу квантів:

$$E^{kin} + E^{pot} = n\hbar\omega. \quad (21.2)$$

З формули (21.2) впливала умова квантування моменту імпульсу електрона:

$$m_e v r_n = n\hbar, \quad (21.3)$$

де m_e – маса електрона; v – його швидкість; r_n – радіус орбіти; n – головне квантове число ($n = 1; 2; 3; 4; \dots$).

Використовуючи умову квантування (21.3) і другий закон Ньютона, визначимо:

$$m_e \frac{v^2}{r_n} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Zee}{r_n^2}, \quad (21.4)$$

де Ze – заряд ядра (для гідрогену $Z = 1$), Бор отримав формули для радіусів електронних орбіт та енергії атома гідрогену:

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} n^2, \quad E_n = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2}, \quad (21.5)$$

де h – стала Планка.

На основі цих розрахунків Бор сформулював постулати:

- *існують стаціонарні енергетичні стани атома. У стаціонарному стані атом не випромінює енергії;*
- *атом випускає або поглинає квант енергії під час переходу з одного стаціонарного стану в інший (рис. 21.2). Енергія кванта дорівнює різниці енергій стаціонарних станів (рис. 21.3):*

$$h\nu = E_n - E_m = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (21.6)$$

За теорією Бора, в нормальному стаціонарному стані електрон рухається по найближчій до ядра дозволених орбіті, радіус якої $r_1 \approx 0,53 \cdot 10^{-10}$ м. У збудженому стані атом довго перебувати не може. Через проміжок часу в середньому близько 10^{-8} с атом спонтанно переходить у незбуджений стан, випромінюючи фотон.

Теорія Бора відіграла важливу роль у розвитку атомної фізики, але її суттєвим недоліком виявилася нездатність описати атомні спектри, навіть спектр атома гелію.

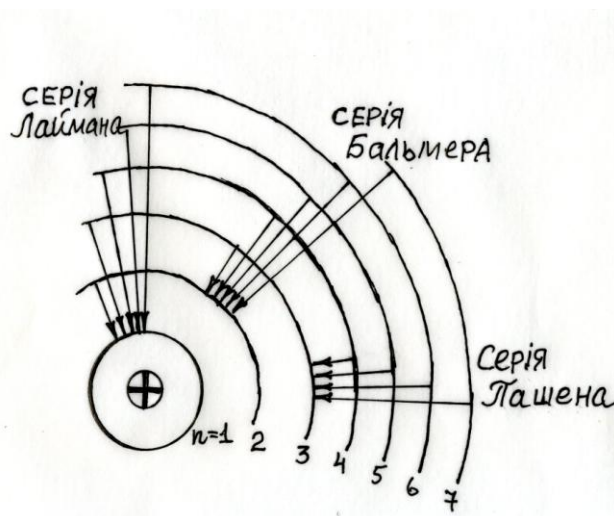


Рис.21.2

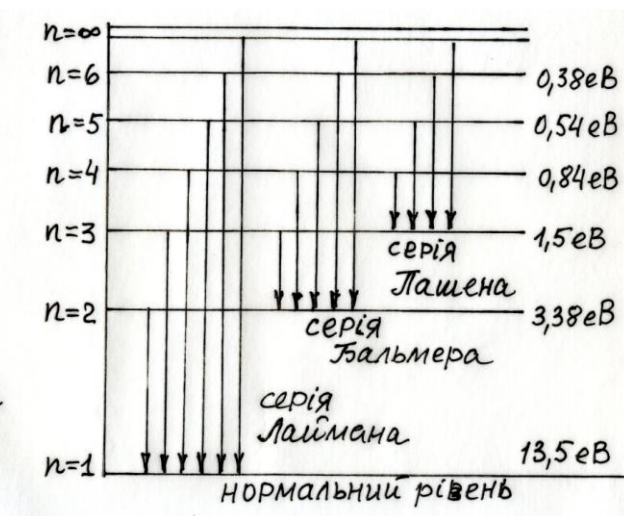


Рис. 21.3

21.4. Гіпотеза де Бройля. Атом у квантовій механіці

Подальший розвиток атомної теорії пов'язаний з французьким фізиком Луї де Бройлем. У 1924 р. він висловив гіпотезу, що мікрочастинкам властивий корпускулярно-хвильовий дуалізм (табл. 21.1).

Таблиця 21.1

Оптико-механічна аналогія

| Фотон | Мікрочастинка |
|---|---|
| $E = \hbar\omega$ | $\omega = \frac{E}{\hbar}$ |
| $p = \hbar k = \frac{h}{2\pi} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{h}{\lambda}$ | $\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p_e} = \frac{h}{p_e}$ |

Таким чином, за теорією де Бройля електрону відповідає хвильовий процес з довжиною хвилі:

$$\lambda = \frac{h}{p_e} = \frac{h}{m_e v}, \quad (21.7)$$

де h – стала Планка; p_e – імпульс мікрочастинки.

Згідно з гіпотезою де Бройля імпульс фотона замінено на імпульс електрона $p_e = m_e v$. Гіпотеза де Бройля у 1927 р. була підтверджена експериментально американськими ученими Девіссоном і Джермером, які виявили дифракцію електронів на кристалічній решітці. У наш час дифракція електронів широко використовується в електронних мікроскопах для дослідження структури речовини.

На зміну «напівквантовій» теорії атома за Бором прийшла квантова теорія, яка врахувала хвильові властивості мікрочастинок. Квантова теорія повністю не виключає теорії Бора, а навпаки включає її, указуючи на границі її застосовності.

Хвильові властивості мікрочастинок приводять до того, що принципово неможливо *одночасно* абсолютно точно виміряти положення та імпульс мікрочастинки. Німецький фізик В. Гейзенберг запропонував співвідношення невизначеностей, згідно з яким *добуток невизначеностей канонічно спряжених величин не може бути меншим від сталої Планка*:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}; \quad \Delta y \cdot \Delta p_y \geq \frac{\hbar}{2}; \quad \Delta z \cdot \Delta p_z \geq \frac{\hbar}{2}, \quad (21.8)$$

де $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – невизначеності координат мікрочастинки, $\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z$ – невизначеності імпульсів.

Енергія та час також є канонічно спряжені величини:

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}. \quad (21.9)$$

Співвідношення означає, що чим більший час існування стану системи, тим менш невизначеною є його енергія. Це проявляється в розширенні спектральних ліній випромінювання атомів.

У квантовій механіці для опису стану мікрочастинок використовують хвильову (пси-) функцію, яка є функцією координат і часу: $\psi(x, y, z, t)$. Ймовірність dP знайти мікрочастинку в деякому малому елементі об'ємом dV описується формулою:

$$dP = |\psi|^2 dV, \quad (21.10)$$

де $|\psi|^2 = \frac{dP}{dV}$ – квадрат модуля ψ -функції має зміст густини ймовірності.

Ймовірність знайти мікрочастинку в деякому об'ємі V дорівнює:

$$P = \int_V dP = \int_V |\psi|^2 dV. \quad (21.11)$$

Псі-функцію знаходять розв'язавши диференціальне рівняння Шредингера. Розв'язавши рівняння Шредингера знаходять вид псі-функції і спектр енергії мікрочастинки. Для вільної мікрочастинки яка рухається вздовж осі x , псі-функцію можна отримати, замінивши у рівнянні плоскої монохроматичної хвилі частоту через енергію $\omega = \frac{E}{\hbar}$, а хвильове число – на імпульс мікрочастинки

$$k = \frac{p}{\hbar} :$$

$$\psi(x,t) = Ae^{-\frac{i}{\hbar} Et - px}, \quad (21.12)$$

де $i = \sqrt{-1}$.

Спектр енергії вільної частинки суцільний, тобто вона може мати будь-яке значення енергії. Різниця в поведінці мікрочастинки в класичній і квантовій механіці, наприклад, проявляється в тому випадку, коли вона зустрічає енергетичний потенціальний бар'єр.

Розв'язок рівняння Шредингера показує, що, залежно від висоти і ширини бар'єра, існує кінцева ймовірність просочування мікрочастинки крізь бар'єр. Цей квантомеханічний (тунельний) ефект не має аналога у класичній фізиці. Такі явища, як холодна електронна емісія, α -розпад, переходи у напівпровідниках знаходять повне кількісне пояснення за допомогою тунельного ефекту. Тунелювання електронів застосовується у скануючому тунельному мікроскопі (СТМ), який дає змогу розглядати окремі атоми і молекули, конструювати з них нові поверхневі структури.

Опис станів за допомогою рівняння Шредингера є досить складною задачею. Під час її розв'язання такої для атома водню в рівняння підставляють потенціальну енергію взаємодії зарядів електрона і ядра. Розв'язання рівняння Шредингера для атома водню має вигляд добутку трьох функцій, кожна з яких залежить від однієї змінної. Кожна функція має цілий набір (спектр) розв'язків, кожному з яких відповідає певне квантове число.

Головне квантове число $n = 1; 2; 3; \dots$ визначає рівні енергії електрона, які збігаються з відповідною формулою теорії Бора.

Орбітальне квантове число ℓ характеризує орбітальний момент імпульсу L_ℓ електрона відносно атомного ядра:

$$L_\ell = \sqrt{\ell(\ell+1)} \cdot \hbar. \quad (21.13)$$

Магнітне квантове число m_ℓ визначає проекції орбітального моменту імпульсу на деякий довільно вибраний напрям поля z :

$$L_{\ell z} = m_\ell \cdot \hbar. \quad (21.14)$$

Квантове число m_ℓ описує розщеплення енергетичних рівнів з головним квантовим числом n на $2\ell+1$ підрівнів у магнітному полі. Експериментально розщеплення рівнів енергії атомів у магнітному полі було виявлено в 1896 р. і отримало назву ефекту Зеемана. Розщеплення рівнів енергії в електричному полі, називається ефектом Штарка. Стан електрона в багатоелектронних атомах характеризується четвертим (спіновим) квантовим числом m_s .

Виявилось, що в електрона є власне магнітне поле, яке характеризується спіновим магнітним моментом, і власний момент імпульсу L_s , який може набувати значень:

$$L_s = \sqrt{s(s+1)} \hbar, \quad (21.15)$$

де $s = 0,5$ – спінове квантове число, або спін електрона.

Магнітне спінове квантове число характеризує можливі значення проекції власного моменту імпульсу (спіну) електрона на напрям поля і може набувати тільки двох значень ($m_s = \pm s = \pm 0,5$):

$$L_{sz} = m_s \cdot \hbar = \pm \frac{1}{2} \hbar. \quad (21.16)$$

Стан електрона в атомах з заданими n і ℓ позначається символами $1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 3d$ і т.д. Кількість станів із заданим n і ℓ дорівнює $2(2\ell+1)$.

Загальна кількість станів з однаковим n становить:

$$\sum_{\ell=0}^{\ell=n-1} 2(2\ell+1) = 2n^2. \quad (21.17)$$

Першому рівню енергії атома водню відповідають два стани електрона, другому – вісім, третьому – 18 і т.д. (табл. 21.2).

Згідно з квантовою теорією, заряд електрона ніби з різною густиною розпорошується в об'ємі атома, утворюючи «електронну хмару». У 1s стані найбільш імовірно перебування електрона на відстані 0,0529 нм, що дорівнює радіусові першої борівської орбіти.

Таблиця 21.2

**Значення квантових чисел для стану електрона
в атомі водню**

| Стан | Значення квантових чисел | | | | Стан | Значення квантових чисел | | | |
|------|--------------------------|--------|----------|-------------------|------|--------------------------|--------|----------|-------------------|
| | n | ℓ | m_ℓ | m_s | | n | ℓ | m_ℓ | m_s |
| 1s | 1 | 0 | 0 | $\pm \frac{1}{2}$ | 3p | 3 | 1 | 0 | $\pm \frac{1}{2}$ |
| 2s | 2 | 0 | 0 | $\pm \frac{1}{2}$ | | | | +1 | $\pm \frac{1}{2}$ |
| 2p | 2 | 1 | -1 | $\pm \frac{1}{2}$ | 3d | 3 | 2 | -2 | $\pm \frac{1}{2}$ |
| | | | 0 | $\pm \frac{1}{2}$ | | | | -1 | $\pm \frac{1}{2}$ |
| | | | +1 | $\pm \frac{1}{2}$ | | | | 0 | $\pm \frac{1}{2}$ |
| 3s | 3 | 0 | 0 | $\pm \frac{1}{2}$ | | | | +1 | $\pm \frac{1}{2}$ |
| 3p | 3 | 1 | -1 | $\pm \frac{1}{2}$ | | | | +2 | $\pm \frac{1}{2}$ |

21.5. Періодична система елементів

При переході від опису стану однієї мікрочастинки до систем з великою кількістю частинок користуються квантовими статистиками. Поведінка частинок з напівцілим спіном $\left(S = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots\right)$, підпорядковуються квантовій статистиці Фермі-Дірака (ферміони), а поведінка частинок з цілим спіном $(S = 1, 2, 3, \dots)$ – квантовій статистиці Бозе-Ейнштейна (бозони). Бозони можуть накопичуватися в стані з одним значенням енергії, а ферміони – ні.

У 1925 р. В. Паулі встановив закон, згідно з яким *не може бути двох електронів, що перебували б в однакових стаціонарних станах, які визначаються однаковим набором чотирьох квантових чисел*. Для системи електронів в атомі, що перебувають у стані, який описується набором квантових чисел n , ℓ , m_ℓ , m_s , принцип Паулі записується так:

$$Z \ n, \ell, m_\ell, m_s = 0 \text{ або } 1. \quad (21.18)$$

Принцип Паулі відіграв велику роль у розвитку атомної і ядерної фізики. За допомогою цього принципу Нільс Бор теоретично обґрунтував періодичну систему елементів. Теорія періодичної системи базується на таких положеннях:

- порядковий номер хімічного елемента дорівнює числу електронів в атомі;
- стан електронів в атомі визначається набором квантових чисел n , ℓ , m_ℓ , m_s . Розподіл електронів за енергетичними станами визначається принципом мінімуму потенціальної енергії.
- заповнення електронами енергетичних станів в атомі відбувається за принципом Паулі.

Електрони, які займають стани з однаковим значенням головного квантового числа n , утворюють електронну оболонку, або електронний шар (табл. 21.3). У кожному з шарів (оболонки) електрони поділяються за підоболонками, які відповідають певним значенням орбітального квантового числа ℓ .

Розглянемо заповнення електронних оболонок (шарів). В атомі водню один електрон у стані $1s$. Електронна конфігурація водню $1s^1$. До $Z=18$ (аргон) електрони заповнюють стани: $1s^2$, $2s^2$, $2p^2$, $3s^2$, $3p^6$. При $Z=19$ (калій) починається заповнення підоболонки $4s$, а не продовжується заповнення підоболонки $3d$.

Заповнення електронних шарів (K , L , M , N , O) – теоретичне (верхній ряд) та природне (нижній ряд) – наведено в табл. 21.4.

Розбіжності пов'язані з тим, що кожний електрон знаходиться в складному екрануючому полі атомного ядра й інших електронів, а потенціальна енергія електронів на підоболонці $4s$ менша, ніж на $3d$ внаслідок відштовхування електронів.

Таблиця 21.3

Розподіл електронів в атомах за оболонками

| Пор. № | Шар | Кількість електронів у станах | | | | | | | Максимальна кількість електронів $2n^2$ |
|--------|----------|-------------------------------|---|----|----|----|----|----|---|
| | | s | p | d | f | g | h | i | |
| 1 | <i>K</i> | 2 | - | - | - | - | - | - | 2 |
| 2 | <i>L</i> | 2 | 6 | - | - | - | - | - | 8 |
| 3 | <i>M</i> | 2 | 6 | 10 | - | - | - | - | 18 |
| 4 | <i>N</i> | 2 | 6 | 10 | 14 | - | - | - | 32 |
| 5 | <i>O</i> | 2 | 6 | 10 | 14 | 18 | - | - | 50 |
| 6 | <i>P</i> | 2 | 6 | 10 | 14 | 18 | 22 | - | 72 |
| 7 | <i>Q</i> | 2 | 6 | 10 | 14 | 18 | 22 | 26 | 98 |

Хімічні елементи, у яких заповнюються внутрішні стани при заповнених зовнішніх, називаються перехідними. Це такі групи елементів: підгрупа заліза (*Fe, Co, Ni*), рідкоземельні елементи (*Ru, Rh, Pd*), лантаноїди (*La – Lu*), актиноїди (*Ac – Lr*). Наявність незаповнених внутрішніх електронних шарів атомів перехідних металів робить їх парамагнетиками, а деякі з них виявляються феромагнетиками.

Таблиця 21.4

Розподіл електронів за підоболонками

| K | L | M | N | O |
|--------|-------------|---------------------|------------------------|------------------------|
| $1s^2$ | $2s^2 2p^6$ | $3s^2 3p^6 3d^{10}$ | $4s^2 4p^6 4d^{10} 4f$ | $5s^2 5p^6 5d^{10} 5f$ |
| $1s^2$ | $2s^2 2p^6$ | $3s^2 3p^6 4s$ | $3d 4p 5s 4d$ | $5p^2 6s4f 5d$ |

21.6. Рентгенівські і молекулярні спектри

Велику роль у виявленні розподілу електронів за оболонкам відіграло вивчення рентгенівських спектрів атомів.

Довжини хвиль ультрафіолетових променів лежать в інтервалі 0,4–0,05 мкм. В 1895 р. німецький фізик В. Рентген, проводячи досліди з вакуумними двоелектродними трубками, виявив електромагнітне випромінювання з ще меншою довжиною хвиль (0,1–0,001 мкм). Це випромінювання мало велику проникну

здатність, а його поглинання залежало від густини речовини. Так, м'які тканини організму людини поглинали рентгенівські промені слабше, ніж кістки. Це дозволило Рентгену зробити першу фотографію кісток кисті руки.

Природа рентгенівського випромінювання була з'ясована в 1912 р., коли німецькому вченому М. Лауе вдалося спостерігати дифракцію рентгенівських променів на кристалічній решітці. Рентгенівське випромінювання виникає під час гальмування заряджених частинок (електронів, протонів і тощо) з великою енергією у речовині. Якщо напруга, яка прискорює електрони, не дуже велика, то спектр рентгенівського випромінювання – суцільний. Мінімальну довжину хвилі появи рентгенівського випромінювання можна знайти за умови, що енергія фотона повинна дорівнювати енергії електричного поля:

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda_{\min}} = eU; \quad \lambda_{\min} = \frac{hc}{eU}. \quad (15.1)$$

Спектральний склад рентгенівського випромінювання залежить від енергії електронів і матеріалу речовини. Якщо напруга, що прискорює електрони становить 40–100 кВ, то на фоні гальмового рентгенівського випромінювання виникають спектральні лінії характеристичного випромінювання (рис. 21.4). Воно виникає тому, що електрони проникають у глибину атома і вибивають електрони з внутрішніх шарів.

Характеристичне рентгенівське випромінювання складається з *L*-, *M*-, *N*-серій (рис. 21.5). При випромінюванні основної *K*-серії звільняються місця в більш високих шарах і одночасно випромінюються рентгенівські фотони інших серій. На відміну від оптичних спектрів, характеристичні рентгенівські спектри дуже прості.

Англійський фізик Г. Мозлі (1887–1915) встановив закон, який подібний до узагальненої формули Бальмера:

$$\nu = R Z - \sigma^2 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (21.19)$$

де ν – частота спектральної лінії, $R = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ c}^{-1}$ – стала Ридберга; σ – стала екранування (для лінії K_α $\sigma = 1$, для лінії L_α $\sigma = 7,5$); $n = 1; 2; 3; \dots$; $m = n + 1$.

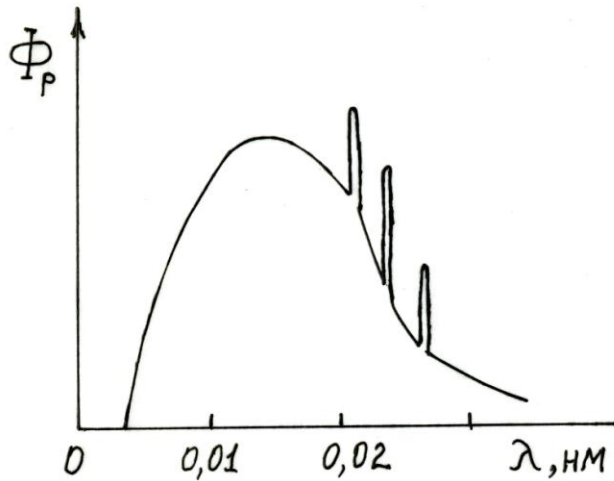


Рис. 21.4

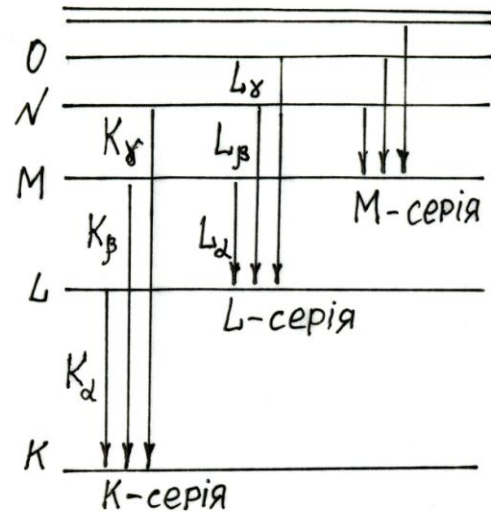


Рис. 21.5

Закон Мозлі (інший запис закону $\sqrt{\omega} = C(Z - \delta)$, де C – стала) відіграв значну роль у розміщенні хімічних елементів у періодичній системі тому що за характеристичним спектром випромінювання атома він дозволив установлювати атомний номер хімічного елемента.

Рентгенівське випромінювання широко застосовується в медицині та різних галузях науки і техніки.

Між атомами в молекулах діють два види зв'язку. Гетерополярний або іонний зв'язок здійснюється, якщо навколо одних ядер молекули відтворюється надлишок валентних електронів, а навколо інших ядер їх не вистачає. Молекула немов би складається з двох іонів, які мають протилежні знаки.

Гомеополярний, або ковалентний зв'язок здійснюється в тих молекулах, де частина електронів рухається навколо обох ядер. Найпростішою молекулою з гомеополярним зв'язком є молекула водню. У 1927 р. Вальтер Гайтлер і Фріц Лондон знайшли розв'язання рівняння Шредингера для молекули водню.

При заданій електронній конфігурації атоми можуть коливатись і обертатись, тому енергія молекули складається з енергії електронної конфігурації, енергії коливань та енергії обертання:

$$E = E_{el} + E_v + E_r \dots \quad (21.20)$$

Виявилось, що енергія коливального руху та енергія обертання молекули квантуються. Таким чином, повна енергія молекули:

$$E = E_{en} + \left(n_v + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega + \frac{J(J+1)}{2J_r} \hbar^2, \quad (21.21)$$

де $n_v = 0, 1, 2, 3, \dots$ – коливальне квантове число; $J = 0, 1, 2, 3, \dots$ – обертальне квантове число; J_r – момент інерції молекули.

Під час переходів між енергетичними рівнями молекул утворюються складні смугасті спектри (рис. 21.6).

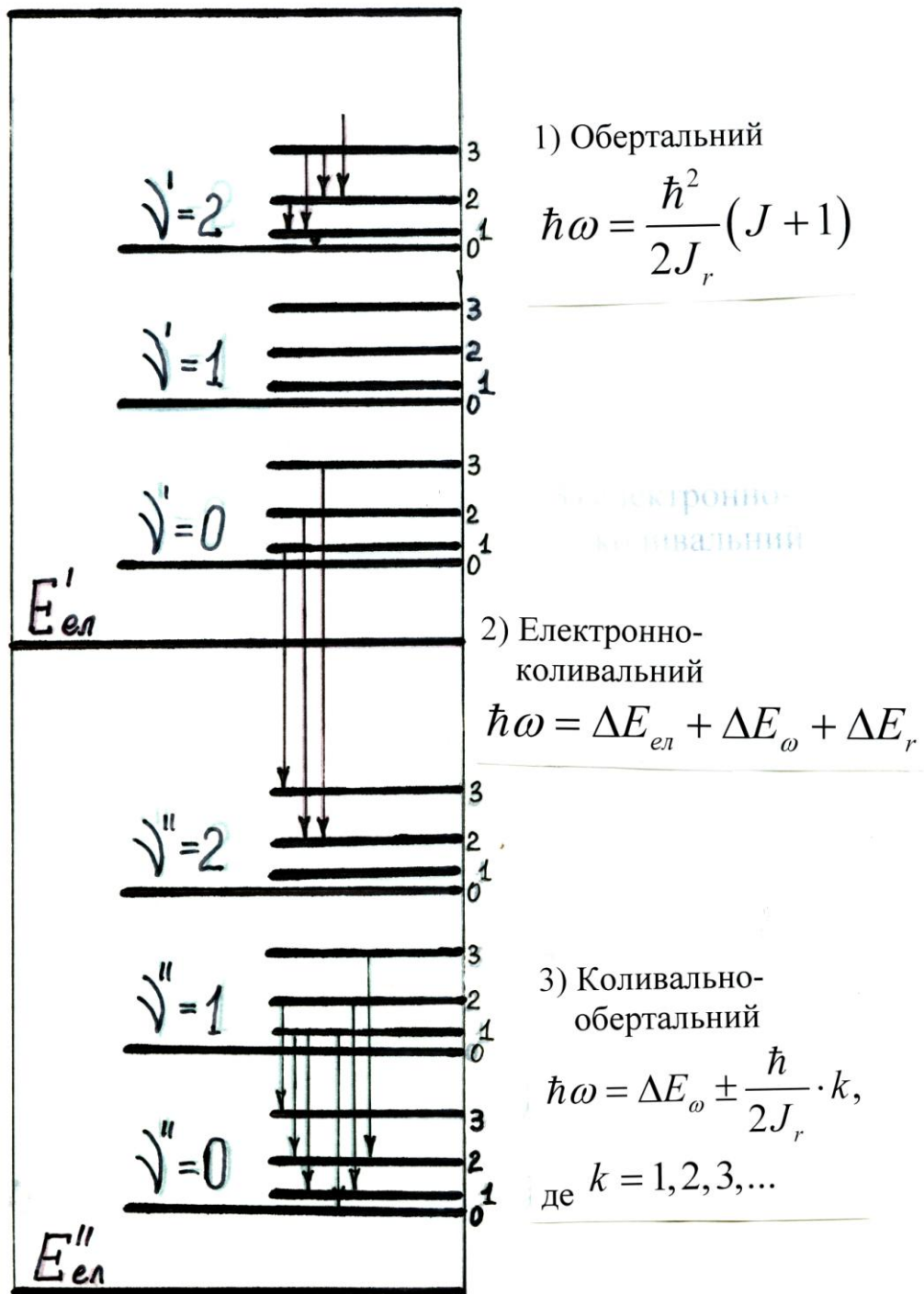


Рис. 21.6

Молекулярні спектри складаються з різких з одного краю смуг. При різних типах переходів виникають різні види молекулярних спектрів: електронно-коливальні ($\hbar\omega = E_{el} + E_v + E_r$), обертальні (ротаційні) ($\hbar\omega = E_r$), коливально-обертальні ($\hbar\omega = E_v + E_r$). Найменшу енергію мають фотони при зміні швидкості обертання. Обертальні смуги складаються з ряду ліній в інфрачервоній області, розташованих на однаковій відстані одна від одної. Якщо при переході змінюється і коливальний, і обертальний стан молекули – виникає коливально-обертальний спектр. Відзначимо, що обертальні і коливально-обертальні спектри виникають лише у несиметричних двоатомних молекулах.

У 1928 р. російські вчені Г.С. Ландсберг, Л.І. Мандельштам і одночасно індійські фізики Ч. Раман і К. Кришнан відкрили явище комбінаційного розсіяння світла – в спектрі розсіяного світла, який пройшов крізь газ, рідину або прозоре кристалічне тіло, з'являються спектральні лінії з частотами-супутниками:

$$\omega = \omega_0 \pm \omega_i. \quad (21.22)$$

За допомогою комбінаційного розсіяння світла здійснюють аналіз складних сумішей органічних молекул, аналіз яких хімічними методами неможливий.

21.7. Спонтанне та вимушене випромінювання. Лазери

Теорія Бора констатувала короткочасність існування збуджених станів атомів. Унаслідок самочинних (спонтанних) переходів збуджених атомів у менш збуджений та незбуджений стани виникає неполяризоване та некогерентне електромагнітне випромінювання.

У 1918 р. Ейнштейн звернув увагу на те, що вимушених переходів атомів з нижчих на вищі рівні та спонтанних переходів з вищих на нижчі рівні недостатньо для встановлення рівноваги між випромінюванням та речовиною. Для встановлення рівноваги потрібно, щоб відбувалися також переходи атома з вищого рівня на нижчий за рахунок вимушеного (індукованого) випромінювання. Частота, фаза, напрям і поляризація індукованого випромінювання повністю збігаються з відповідними характеристиками падаючого випромінювання.

Розглянемо детальніше процеси випромінювання і поглинання фотонів між двома енергетичними рівнями (рис. 21.6). В умовах рівноваги кількість переходів з нижнього рівня на верхній та з верхнього на нижній повинна бути однаковою:

$$N_{mn}^{ind} = N_{nm}^{ind} + N_{nm}^{спонт.} \quad (21.24)$$

У незбудженому (рівноважному) стані більшість атомів ($N_m > N_n$) знаходиться на нижчих рівнях (рис. 21.6), тобто заселеність рівнів N_n є меншою, ніж заселеність рівнів N_m , і визначається розподілом Больцмана. Під час проходження електромагнітного випромінювання крізь поглинальну речовину зміна інтенсивності описується законом Бугера:

$$I = I_0 e^{-\alpha x}, \quad (21.25)$$

де α – коефіцієнт поглинання; x – товщина шару речовини.

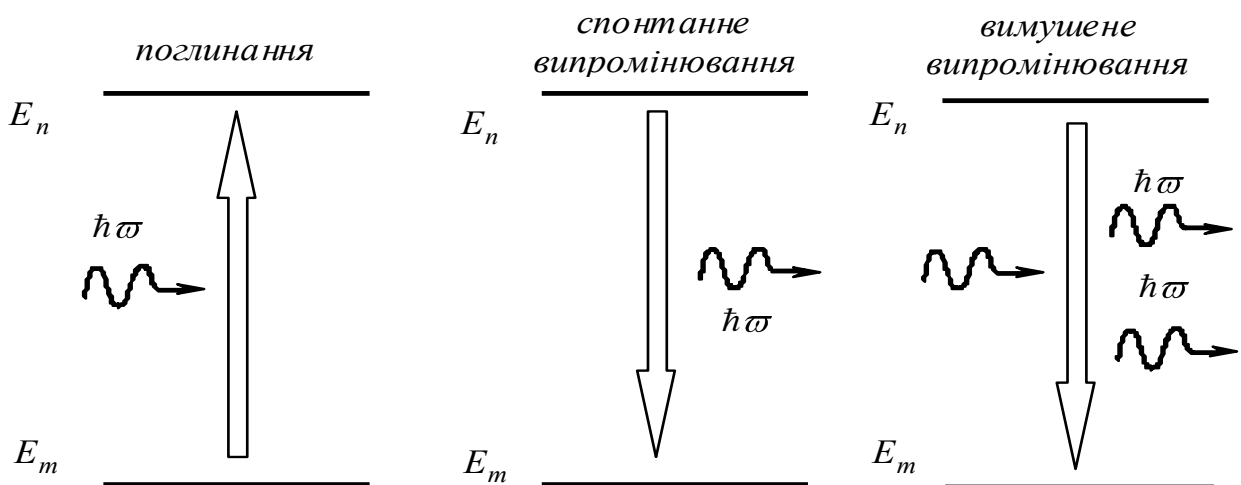


Рис. 21.6

У нерівноважній системі з інверсною ($N_m < N_n$) населеністю рівнів індуковане випромінювання переважає спонтанне – спостерігається підсилення. Явище протікає так, неначе коефіцієнт поглинання α в законі Бугера став від’ємним. Нерівноважний стан такої системи характеризується від’ємною температурою.

Уперше принципову можливість підсилення світла за рахунок приєднання до первинного пучка вимушеного випромінювання сформулював у 1940 р. Володимир Олександрович Фабрикант. У 1951 р. В.О. Фабрикант, М.М. Вудинський, Ф.А. Бутаєва одержали

авторське свідотцтво на конкретний спосіб підсилення електромагнітних хвиль. Реалізувати підсилення ультракоротких радіохвиль стимульованим випромінюванням у 1954 р. зуміли Микола Геннадійович Басов, Олександр Михайлович Прохоров (ФІАН) і Чарльз Таунс (Колумбійський університет) на молекулах аміаку. За створення мазерів («microwave amplification by stimulated emission of radiation» – підсилювання мікрохвиль шляхом стимульованої емісії випромінювання) Басов, Прохоров і Таунс в 1964 р. були відзначені Нобелівською премією. Перший оптичний квантовий генератор (ОКГ) – лазер («light amplification by stimulated emission») був створений на монокристалі рубіна американським фізиком Теодором Мейманом у 1960 р. У тому ж році американські фізики Алі Джаван, У. Беннет і Д. Ерріот створили перший газовий (гелієво-неоновий) лазер.

Лазери класифікують за видом активного середовища (твердотільні, газові, напівпровідникові, рідинні), та за методами «накачки» (оптичні, теплові, хімічні, електроіонізаційні, напівпровідникові та ін.).

Лазер обов'язково повинен мати такі основні компоненти:

- 1) активне середовище з інверсною заселеністю енергетичних рівнів (рис. 21.7);
- 2) система накачування енергії;
- 3) оптичний резонатор (пристрій, який формує світловий потік у заданому напрямку).

Система накачування (у твердотільних лазерах – це лампа-спалах, у газових – газовий розряд) створює середовище з інверсною заселеністю рівнів. Первинні фотони (які спонтанно випромінюють атоми), що рухаються під кутами до осі середовища, виходять назовні фактично без підсилювання. Осьові фотони, як і індуковані ними фотони, рухаючись уздовж осі, викликають лавиноподібне зростання фотонного потоку, чому сприяє відбиття не досить концентрованого потоку від дзеркал (резонатора).

Накладання відбитих від дзеркал і «прямих» фотонів утворює стоячу хвилю, яка виконує індукувальну дію; для цього середовище повинно мати резонансні розміри. Частина випромінювання виходить назовні через напівпрозоре дзеркало. Для підтримання інверсної заселеності протягом роботи лазера повинна відбуватися «підкачка» енергії.

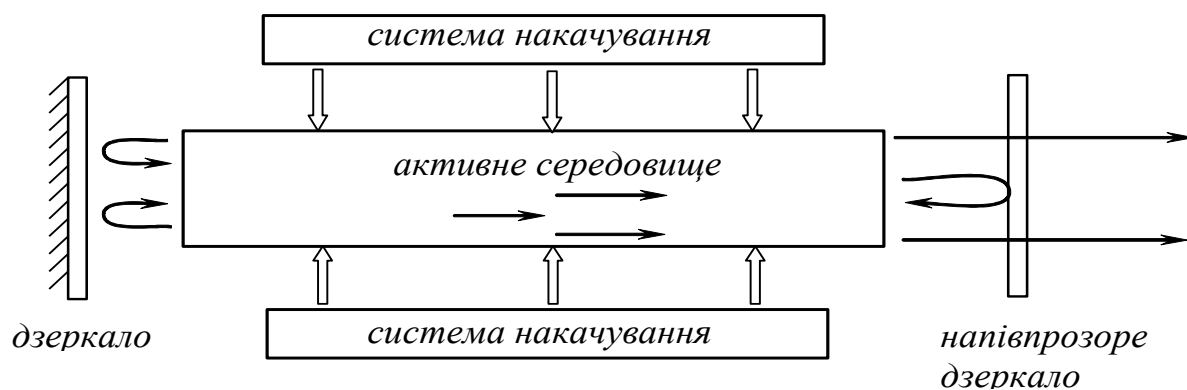


Рис.21.7

Розглянемо процес створення активного середовища на прикладі гелієво-неонового лазера (суміш гелію і неону з співвідношенням концентрацій 10:1 має тиск близько 1 мм. рт. ст.) Енергетичні рівні незбуджених атомів гелію і неону практично однакові ($1s$). Атоми гелію мають два близьких за енергіями підрівня $2s$ (рис. 21.8). Перехід $1s \rightarrow 2s$ відбувається за рахунок непружних співударянь частинок в газовому розряді (фотонний перехід $1s \rightarrow 2s$ заборонено бо при цьому $\Delta l = 0$). При зіткненнях енергія від атомів гелію переходить до атомів неону, частина яких опиняється в стані $4s$, а частина – в стані $5s$.

Час життя атомів неону на рівнях $4s$ і $5s$ на два порядки більше, ніж на рівнях $3p$, унаслідок чого в газовому розряді, при безперервній підкачці енергії, створюється інверсна заселеність рівнів неону $4s$ і $5s$ по відношенню до $3p$. Перехід $5s \rightarrow 3p$ призводить до утворення червоного світла ($\lambda = 0,6328$ мкм), а перехід $4s \rightarrow 3p$ – інфрачервоного. Перехід $3p \rightarrow 3s$ відіграє роль очисника рівнів p . Це збільшує відносну інверсну заселеність рівнів $4s$ і $5s$. За рахунок інтенсивного накачування енергії – випромінювання гелій-неонового лазера безперервне.

Випромінювання лазерів має такі властивості: сувору монохроматичність; високу когерентність; мале кутове розходження; велику густину потоку енергії. Залежно від типу лазера ККД змінюється від 0,01 до 75% (для лазера на склі з неодимом).

Лазери знайшли широке застосування в сучасній техніці і побуті: для механічної обробки (свердлування, точкова, поверхнева закалка сталі, зварювання, фігурне різання); для отримання голо-

графічного зображення; в інженерній геодезії і будівництві (далекоміри, теодоліти, візири); у медицині, генній інженерії; під час передачі і запису інформації (лазерні диски); для здійснення в лабораторних умовах керованої термоядерної реакції.

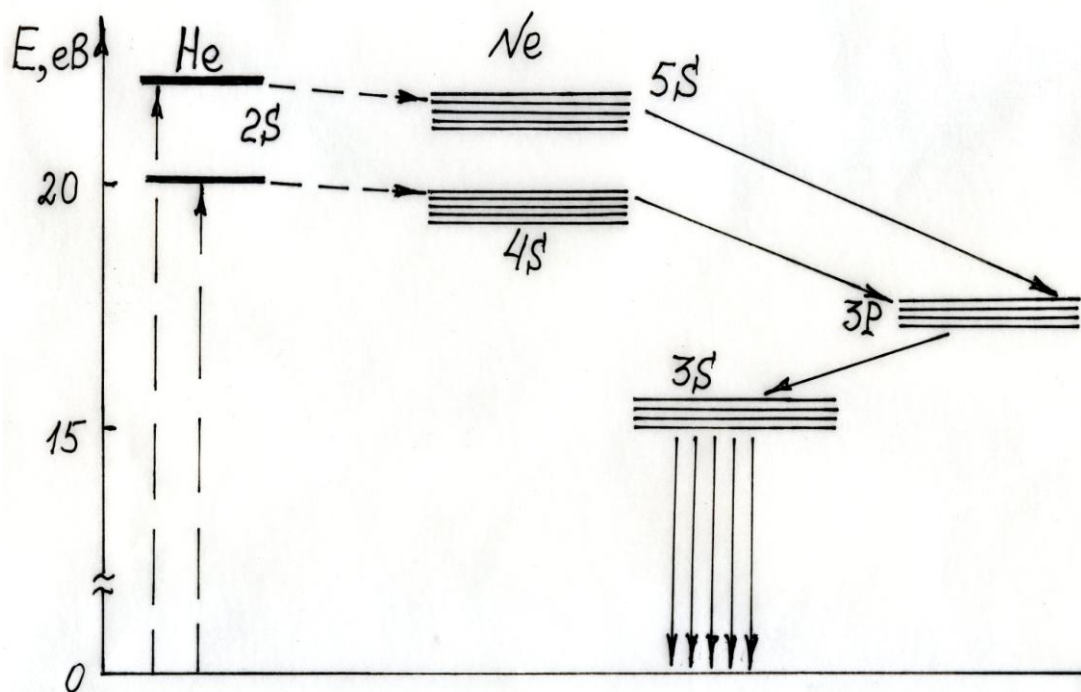


Рис. 21.8

Контрольні запитання

1. Які види молекулярних спектрів ви знаєте?
2. У чому суть вимушеного випромінювання?
3. Що називають інверсною заселеністю енергетичних рівнів?
4. Що називають від'ємною абсолютною температурою?
5. Які основні компоненти обов'язково повинен мати лазер?
6. Принцип роботи та будова лазера.
7. Розгляньте процес створення активного середовища на прикладі гелієво-неонового лазера.

21.8. Біологічна дія електромагнітного випромінювання

Живі організми на Землі піддаються впливу електромагнітного випромінювання природного і штучного походження. Основними джерелами природного фону радіодіапазону є грозові розряди, радіовипромінювання Сонця та зірок. Штучні джерела

радіохвиль – радіомовні і телевізійні станції, радіолокатори, системи зв'язку.

Біологічні об'єкти також випромінюють електромагнітні хвилі завдяки процесам, що відбуваються в живому організмі. Кожна клітина володіє електричним потенціалом. Залежність потенціалу якогось органу від часу лежить в основі електрографії (електрокардіографії, електроміографії, електроенцефалографії та ін.). Мозок людини випромінює величезну кількість хвиль різної частоти. Виявлено видиме випромінювання людини. Найбільша інтенсивність випромінювання фіксується з кінчиків пальців. Вважається, що це свічення є хемілюмінесценцією, яка зумовлена оксидуванням ліпідів з переходом молекул у збуджений стан. Фізичне поле – важливе джерело інформації про стан організму людини. Надвисокочастотне (НВЧ) опромінювання призводить до пониження вмісту кисню у тканинах, падіння працездатності, порушення нервової та серцево-судинної систем. Особам, професійно зв'язаним з НВЧ-опроміненням, інтенсивність випромінювання впродовж 8-годинного робочого дня не повинна перевищувати $0,1 \text{ Вт/м}^2$. За нормами Всесвітньої організації охорони здоров'я перебування людини там, де інтенсивність радіохвиль становить 100 Вт/м^2 , заборонено.

22. ЯДЕРНА ФІЗИКА

22.1. Явище радіоактивності

Радіоактивністю називається здатність деяких атомних ядер мимовільно розпадатися з випускненням елементарних часток і електромагнітних випромінювань. Природна радіоактивність спостерігається у важких хімічних елементах. Радіоактивність елементів, отриманих за допомогою ядерних реакцій, називається штучною.

Явище радіоактивності було відкрито в 1896 р. А. Беккерелем, що проводив досліди з люмінесценції (світіння) солей урану під дією сонячного світла. Він вирішив перевірити: чи не випускають солі урану рентгенівські промені після опромінення світлом? Одного разу через хмарну погоду дослід провести не вдалося. Тоді Беккерель забрав фотопластинку, загорнену в чорний папір, поклав

у ящик стола, а на нього – мідний хрест, покритий сіллю урану. Проявивши про всяк випадок фотопластинку через два дні, він виявив на ній почорніння у формі хреста. Солі урану без зовнішнього впливу випускали випромінювання великої проникної здатності.

Було виявлено, що в електричному і магнітному полях це випромінювання розділяється на три частини, які отримали назви альфа-, бета- і гамма-промені. Альфа-промені мають позитивний заряд, бета-промені – негативний, а гамма-промені не відхиляються в електричному і магнітному полях.

Дослідження показали, що: α -промені – це пучок двічі іонізованих атомів гелію; β -промені – це пучок електронів високої енергії; γ -промені – це тверде електромагнітне випромінювання, що має велику проникну здатність. У результаті радіоактивного розпаду вихідне (материнське) ядро перетворюється в ядро іншого елемента (дочірнє ядро). У свою чергу, дочірнє ядро теж може розпадатися. У природі існує три ряди радіоактивних перетворень, у яких наступний хімічний елемент виникає з попереднього в результаті альфа- або бета-розпаду. Виявилось, що радіоактивний розпад – властивість самих атомних ядер, він не залежить від зовнішніх умов: температури, тиску, агрегатного стану, наявності електричних і магнітних полів. Існують такі види розпаду:

- *α -розпад важких ядер ($A > 200$);*
- *β -розпад;*
- *спонтанний (мимовільний) розпад важких ядер;*
- *протонна (або двопротонна) радіоактивність.*

При різних видах розпаду дочірнє ядро, що утворилося, перебуває в збудженому стані, тому всі види розпаду супроводжуються гамма-випромінюванням.

Учені Ф.Содді і Е.Резерфорд отримали закон, згідно з яким кількість розпадів dN за малий час описується диференціальним рівнянням:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N, \quad (22.1)$$

де N – кількість ядер ізотопу; λ – позитивна стала розпаду. Знак мінус означає, що кількість речовини $N(t)$ зменшується з

часом. Розв'язання рівняння (закон радіоактивного розпаду) має вигляд:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (22.2)$$

де N – кількість ядер, що не розпалися; N_0 – вихідна кількість атомів; e – основа натуральних логарифмів, λ – стала розпаду заданого хімічного елемента. Швидкість розпаду характеризують періодом напіврозпаду. **Період напіврозпаду $T_{0,5}$ виміряється часом, протягом якого кількість ядер зменшується**

у два рази. Підставивши у формулу (22.2) $N = \frac{N_0}{2}$ і час $t = T_{0,5}$, одержимо:

$$T_{0,5} = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (22.3)$$

Усі види радіоактивного випромінювання більшою або меншою мірою іонізують речовину, засвічують фотоплівку, збуджують флуоресценцію деяких твердих тіл і рідин.

22.2. Активність ізотопу

Активність ізотопу A є величина, що дорівнює відношенню числа dN ядер, які розпалися, до проміжку часу dt , за який відбувається розпад. Активність визначається за формулою:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (22.4)$$

або після заміни N за основним законом радіоактивного розпаду:

$$A = \lambda \cdot N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}, \quad (22.5)$$

де A_0 – активність ізотопу у початковий момент часу ($t = 0$).

У системі СІ одиниця активності «один розпад за секунду» називається – бекерель (Бк); $1 \text{ Бк} = \text{с}^{-1}$. Позасистемна одиниця – кюрі; $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$.

Питома активність радіоактивного джерела виміряється відношенням активності A до маси джерела. Питома активність радію-226 становить 1 Ки/г . Об'ємна активність радону у повітрі над материками – $10\text{--}100 \text{ Бк/м}^3$.

У суміші радіоактивних ізотопів, які утворюються один з одного, установлюється стан рівноваги, при якому активності усіх

членів ряду однакові між собою, якщо стала розпаду першого члена ряду значно менша від сталих розпаду решти членів ряду:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots \lambda_k N_k. \quad (22.6)$$

22.3. Реєстрація радіоактивних випромінювань

Сцинтиляційні лічильники

Під час бомбардування зарядженими частками деяких речовин (нафталіну, сірчастого цинку, йодистого калію) в них виникають спалахи світла (сцинтиляції). Методом сцинтиляцій Резерфорд вивчав розсіювання α -частинок.

Головною частиною сучасного сцинтиляційного лічильника є люмінесцентний екран (рис. 22.1), що за допомогою світловоду з'єднаний з фотоелектронним помножувачем (ФЕП). Спалах на екрані, викликаний влученням частки, через світловід передається на фотокатод. Фотони вибивають із фотокатода електрони, які направляються на перший електрод. Електрони вибивають з електрода вторинні електрони, які потрапляють на другий електрод, і т.д. Це дозволяє одержати посилення до 10^8 разів.

Напівпровідниковий лічильник

Напівпровідниковий лічильник – це плоский напівпровідниковий діод, що включений в електричне коло у зворотному напрямку. Якщо через р-п перехід пролетить заряджена частка, то носії струму, що утворилися (електрони і дірки), створять імпульс струму, що буде зафіксований приладом. Такий лічильник не фіксує α -частинок, у яких дуже низька проникна здатність.

Лічильник Гейгера–Мюллера

Лічильник Гейгера–Мюллера складається з порожнього металевого циліндра (камери), по осі якого натягнута тонка металева нитка (рис. 22.2). Між негативно зарядженим циліндром і ниткою прикладають напругу 800 – 1000 В. Нитка заземлена через великий опір. У середині циліндра перебуває інертний газ під невеликим тиском. Частка, що потрапляє в камеру лічильника, іонізує газ, і між циліндром та ниткою виникає імпульс струму. Камеру підключають до автоматичного лічильника імпульсів.

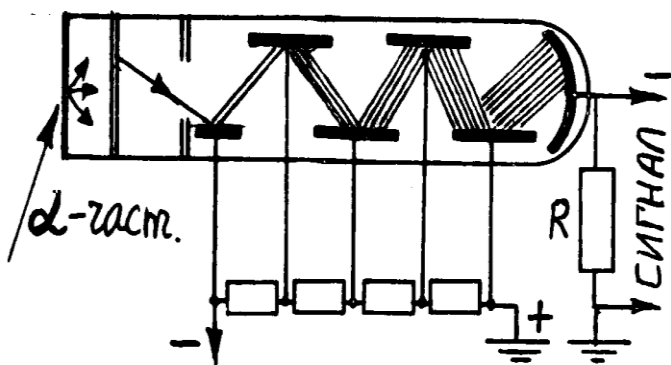


Рис. 22.1

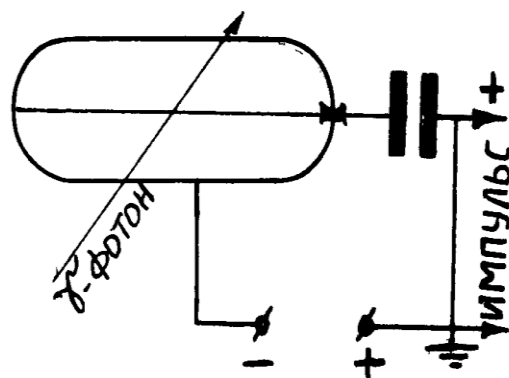


Рис. 22.2

Камера Вільсона

Камера Вільсона являє собою заповнений парами спирту або чотирихлорного вуглецю циліндр з рухливим поршнем. Під час швидкого (адіабатичного) розширенні пари температура знижується і пара стає пересиченою. Якщо всередину циліндра потрапляє заряджена частка, то на своєму шляху вона іонізує пересичену пару, що конденсується у вигляді ланцюжка крапель. Ці ланцюжки можна фотографувати. Для визначення характеристик часток камеру Вільсона поміщають у магнітне поле.

Пузиркова камера

Пузиркова камера – своєрідна модифікація камери Вільсона. У пузирковій камері робочою речовиною є зріджений газ під тиском. При зниженні тиску рідина переходить у перегрітий стан. Частка, яка влетіла в перегріту рідину, викликає її закипання, й уздовж траєкторії руху частки утворюється ланцюжок пухирців газу. Існують і інші методи реєстрації радіоактивних випромінювань: іскрова камера, черенківський лічильник.

22.4. Склад і будова атомного ядра

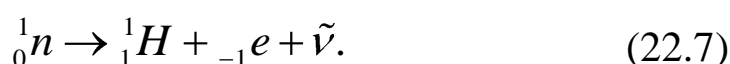
Наукою встановлено, що ядро атома складається з нуклонів (протонів і нейтронів). Загальне число нуклонів у ядрі називається масовим числом A . До складу ядра входять Z протонів і N нейтронів, тому $A = Z + N$. Ядро позначають A_ZX , де X – символ хімічного елемента. Заряд ядра $+Ze$, де $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Важливою характеристикою нуклонів і ядра є маса. У 1962 р. була прийнята вуглецева шкала атомних мас.

За одиницю маси прийнята $\frac{1}{12}$ маси ядра ізотопу вуглецю ${}^{12}_6\text{C}$, що умовно позначають *a.e.m.* ($1\text{a.e.m.} = 1,6603 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$).

Протон має позитивний елементарний заряд $+e$, масу спокою $m_p \approx 1836m_e$. Протон має спін $S = \frac{1}{2}$ і власний додатний магнітний момент. Протон є дуже стабільною частинкою.

Нейтрон – не має заряду, маса спокою $m_n \approx 1839m_e$, має спін $S = \frac{1}{2}$ і власний від’ємний магнітний момент. У вільному стані (поза ядром) нейтрон швидко розпадається на протон, електрон і антинейтрино:

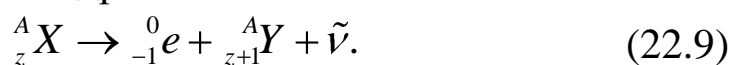


Процеси перетворення ядер зручно записувати за допомогою зарядового і масового чисел.

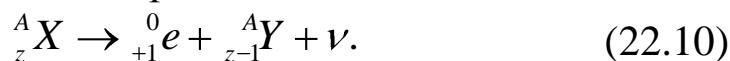
При α -**розпаді** всередині важкого ядра ($A > 200$) формується блок з двох протонів і двох нейтронів (майбутня α -частинка). Енергія α -частинки у ядрі вдвічі менша ніж, енергія ядерних сил, тому вона тунелює скрізь потенціальний бар’єр ядерних сил:



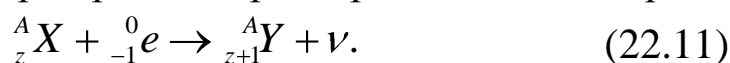
При β^- -**розпаді** нейтрон усередині ядра перетворюється в протон, а електрон вилітає з ядра:



При β^+ -**розпаді** нейтрон усередині ядра перетворюється в протон і позитрон, що вилітає з ядра:



При **e -захваті** (k -захваті) ядро захватує електрон з k -оболонки – усередині ядра протон перетворюється на нейтрон:



Під час всіх ядерних перетворень виконуються закони збереження енергії, імпульсу, масового і зарядового чисел. При

β -розпаді виникає також нейтрино ν , або антинейтрино $\bar{\nu}$, – частинки, маса спокою яких дуже мала або дорівнює нулю.

Атомні ядра з однаковими Z , але різними A називаються ізотопами. У середньому на кожне значення Z припадає близько трьох стабільних ізотопів. Наприклад, ^{28}Si , ^{29}Si , ^{30}Si є стабільними ізотопами кремнію. Крім стабільних, більшість елементів мають і нестабільні ізотопи, для яких характерний обмежений час життя. Більшість хімічних елементів у природі – це суміш ізотопів. Ядра з однаковим масовим числом називаються **ізобарами**, а з однаковим числом нейтронів – **ізотонами**.

Контрольні запитання

1. Що називається радіоактивністю?
2. Яка радіоактивність називається природною, штучною?
3. Які ядра називаються материнськими?
4. Які ядра називаються дочірніми?
5. Що називається періодом напіврозпаду?
6. Яка будова атомного ядра? Що називається ізотопами?
7. Дайте визначення атомної одиниці маси.
8. Що називають протоном? Що називають нейтроном?
9. Напишіть рівняння α і β -розпадів.

22.5. Ядерні сили. Дефект маси

Стійкість атомних ядер показує, що між нуклонами діють більші сили взаємного притягання – ядерні сили. Ядерні сили – короткодійні. На відстані близько 10^{-15} м вони в 137 разів більші від сил електричного відштовхування нуклонів. Ядерні сили мають властивість насичення, тобто нуклони взаємодіють тільки з найближчими сусідами. Ядерні сили не залежать від заряду нуклона, тобто мають зарядову незалежність.

Точні мас-спектрометричні виміри показали, що маса ядра завжди менша від суми мас нуклонів, що входять до складу ядра. Різниця мас одержала назву **дефект маси**:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}, \quad (22.12)$$

де $m_{\text{я}}$ – маса ядра.

У цій формулі масу протона можна замінити на масу атома водню, а масу ядра – на масу атома:

$$\Delta m = Zm_H + (A - Z)m_n - m_a. \quad (22.13)$$

При зміні маси, відповідно до співвідношення Ейнштейна, повинна змінюватися енергія:

$$\Delta m = \Delta mc^2 = (Zm_H + (A - Z)m_n - m_a)c^2. \quad (22.14)$$

Енергія ΔE , що виділяється під час утворення ядра у вигляді випромінювання, називається енергією зв'язку ядра. Для поділу ядра на нуклони необхідно затратити таку саму енергію. Дефект маси є мірою енергії зв'язку ядра. ($\kappa > 1$).

Важливу інформацію про властивості ядер містить залежність питомої енергії зв'язку від масового числа (рис. 22.3). Питомою енергією зв'язку називається енергія зв'язку, що припадає на один нуклон. З рис. 22.3 видно, що ця залежність має максимум, тобто найбільш стабільними є ядра з середини періодичної системи елементів.

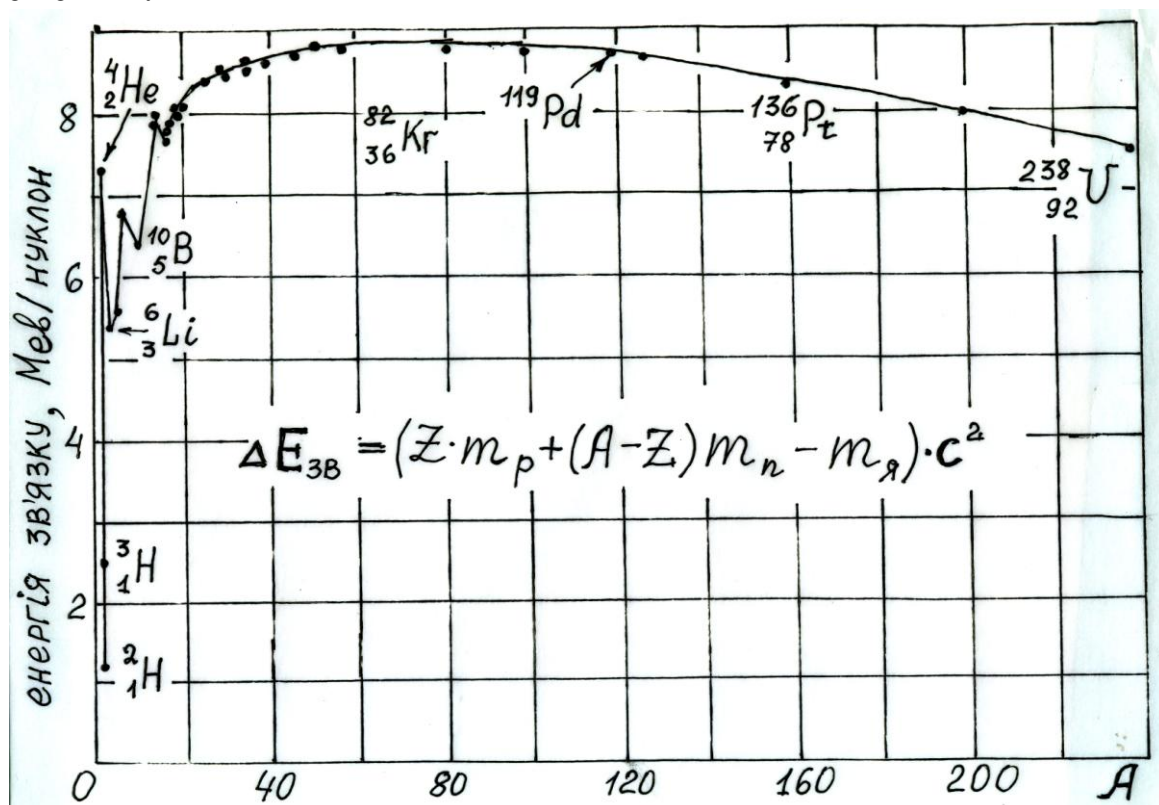


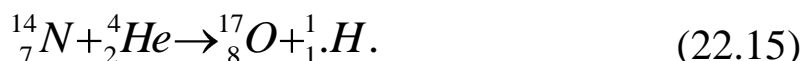
Рис. 22.3

Максимальну енергію зв'язку мають елементи з масовими числами від 80 до 100. Залежність показує, що при розпаді важких ядер і злитті легких ядер повинна виділятися велика кількість енергії.

22.6. Ядерні реакції

Ядерна реакція – це явище перетворення атомних ядер під час їхньої взаємодії з елементарними частками або іншими ядрами.

У ядерних реакціях виконуються закони збереження заряду, енергії, імпульсу і числа нуклонів. Перша штучна ядерна реакція була проведена Резерфордом у 1919 р. Під час опромінення газоподібного азоту альфа-частинками утворювалися кисень і водень:



Найбільш перспективними «снарядами» для одержання нових елементів є нейтрони, які не володіють електричним зарядом. Наприкінці 1938 р. вчені О. Ган і Ф. Штрассман точними хімічними дослідженнями встановили, що в опромінену нейтронами шматку урану утримуються барій і церій, що перебувають у середині періодичної системи елементів. Пояснення дослідів було дано Лізе Мейтнер і О. Фрішем: ядро урану захоплює нейтрон, стає нестійким і розпадається на дві частини. Реакція поділу урану (рис.

22.4) відбувається за такою схемою:

$${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{236}_{92}\text{U} \rightarrow X + Y + (2-3) \text{ нейтрони}.$$

У результаті цієї реакції можуть утворитися до 80 дочірних ядер. Найбільш імовірним виявляється поділ на осколки, маси яких відносяться приблизно як 2:3. Під час поділу ядер урану виділяється величезна енергія зв'язку $\approx 208 \text{ MeV}$ на кожне ядро, а виліт вторинних нейтронів уможливорює ланцюгову ядерну реакцію. Ланцюгова реакція поділу важких ядер характеризується коефіцієнтом розмноження нейтронів k , що дорівнює відношенню кількості нейтронів у даному поколінні до їхнього числа у

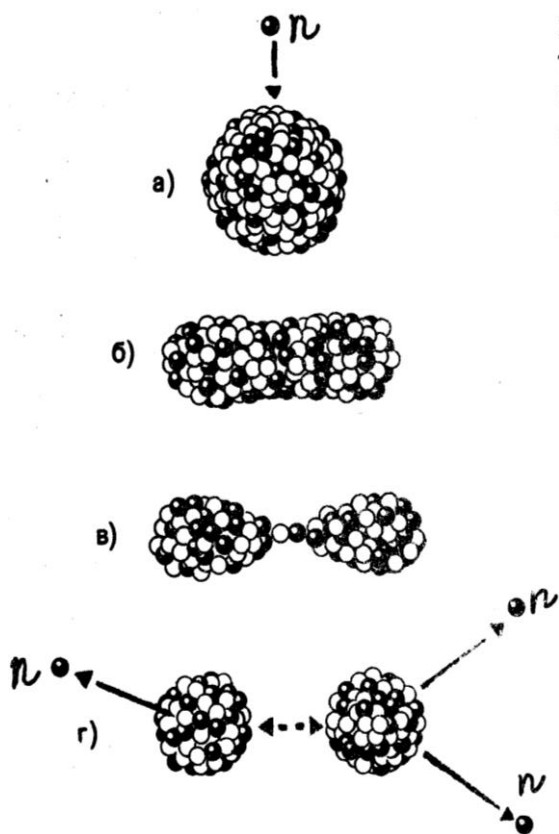


Рис. 22.4

попередньому. Ланцюгові реакції поділяють на керовані і некеровані. Вибух атомної бомби – некерована ядерна реакція ($\kappa > 1$).

Для одержання керованої ланцюгової ядерної реакції необхідно створити такі умови, щоб кожне ядро, що поглинуло нейтрон, під час розпаду виділяло в середньому більш ніж один нейтрон, що йде на розпад другого важкого ядра ($\kappa = 1$).

Ядерним реактором називають пристрій, у якому здійснюється і підтримується керована ланцюгова реакція розподілу важких ядер. Ланцюгова ядерна реакція в реакторі може здійснюватися тільки при певній кількості ядер, що діляться, які можуть ділитися при будь-якій енергії нейтронів. З матеріалів, що діляться, найважливішим є ізоотоп ${}_{92}^{235}\text{U}$, частка якого в природному урані становить усього 0,714 %. Хоча ${}_{92}^{238}\text{U}$ і ділиться нейтронами, енергія яких перевищує 1,2 МеВ, однак ланцюгова реакція, що самопідтримується, на швидких нейтронах у природному урані неможлива через високу ймовірність поглинання нейтронів ядрами ${}_{92}^{238}\text{U}$. Використання сповільнювача нейтронів (як сповільнювач використовують матеріали з малим масовим числом і невеликим перетином поглинання: важка вода, берилій, графіт) приводить до зменшення резонансного поглинання нейтронів в ${}_{92}^{238}\text{U}$.

На рис. 22.5 наведена схема енергетичного ядерного реактора, у якому теплова енергія, що виділяється, переноситься теплоносієм і використовується для виробництва електроенергії.

Із залежності питомої енергії зв'язку від масового числа (див. рис. 22.4) впливає, що легкі ядра можуть зливатися з виділенням енергії. Для злиття необхідно, щоб ядра перебороли сили електростатичного відштовхування і зблизилися на відстань близько 10^{-14} м, тобто щоб вони потрапили у сферу дії ядерних сил.

Термоядерна реакція – це реакція синтезу (злиття) легких ядер при дуже високій температурі. Для одержання енергії дуже перспективною є реакція злиття дейтерію і тритію, у якій виділяється енергія 17,6 Мев:



У цей час ведуться роботи зі створення промислового термоядерного реактора для виробництва електроенергії.

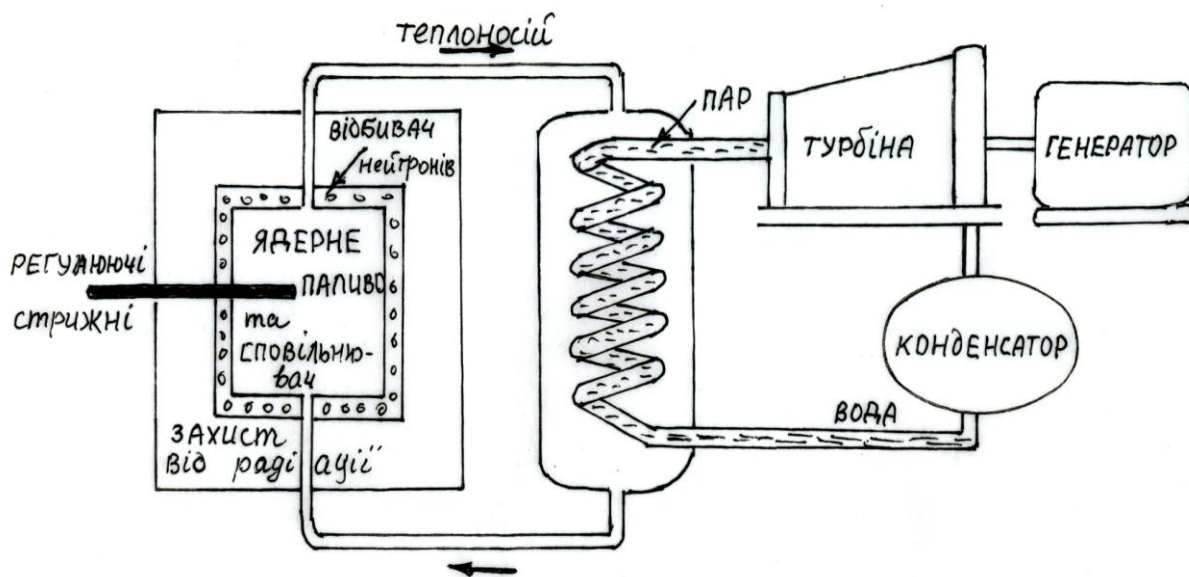


Рис. 22.5

22.7. Біологічна дія і захист від випромінювань

Радіоактивні випромінювання великої інтенсивності впливають на всі живі організми. Характер впливу залежить від поглиненої дози випромінювання і його виду. Про дозу випромінювання роблять висновок за поглиненою енергією, а за експозиційною дозою роблять висновок про іонізуючу здатність.

Дозою поглиненого випромінювання називається величина, що дорівнює енергії випромінювання ΔW , яка поглинена одиницею маси:

$$D = \frac{\Delta W}{m}. \quad (22.17)$$

За одиницю поглиненої дози в системі СІ прийнятий *1 грей* (Гр):

$$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж}/1 \text{ кг}. \quad (22.18)$$

Експозиційною дозою випромінювання (ЕДВ) називається величина, що дорівнює сумарному заряду іонів одного знака, що утворилися в 1 м^3 сухого повітря за нормальних умов. Експозиційна доза в СІ вимірюється в кулонах на 1 кг (Кл/кг). На практиці часто використовується несистемна одиниця

випромінювання – *рентген* ($1P = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$) і її часткові одиниці.

Під час опромінення живих організмів дія випромінювання залежить від його виду. Тому дію різних випромінювань порівнюють із дією рентгенівського і гамма- випромінювань. Із цією метою вводиться *коефіцієнт біологічної ефективності (КОБЕ)*. Для рентгенівського, гамма- і бета- випромінювання *КОБЕ* дорівнює 1, для альфа-часток, протонів і швидких нейтронів він дорівнює 10. Для повільних нейтронів коефіцієнт біологічної ефективності дорівнює 3.

Для оцінки біологічної дії випромінювань уведена еквівалентна доза. *Еквівалентна доза поглиненого випромінювання (ЕДПВ) – величина, що дорівнює добутку поглиненої дози на КОБЕ:* $D_{\text{екв}} = \text{КОБЕ} \cdot D$.

За одиницю *ЕДПВ* в СІ прийнято *1 зиверт (Зв)*. Ця одиниця відповідає поглиненій дозі в *1 грей* при *КОБЕ = 1*. На практиці для виміру впливу випромінювань на біологічні об'єкти використовують одиницю *бер* (біологічний еквівалент рентгена):

1 бер = 0,01 Зв. Людина безупинно піддається дії природного радіоактивного випромінювання й опроміненню під час рентгенівських обстежень. У середньому за рік людина одержує дозу близько 400–500 мбер. Небезпечними прийнято вважати дози більше 35 бер за рік, тому в роботі з радіоактивними речовинами потрібно проявляти обережність.

Людське тіло має власну радіоактивність, яка пов'язана в основному з радіоактивністю калію. Випробування ядерної зброї привели до зміни радіоактивності навколишнього середовища і у всіх людей на земній кулі радіоактивність визначається вже не калієм, а осколочним цезієм. А вибухи водневих бомб давали ще й $^{14}_6\text{C}$, який входить у біологічні ланцюги. Таким чином, склалася критична ситуація – якщо продовжувати ядерні випробування в атмосфері, то виникнуть складні генетичні наслідки. У Москві 5 серпня 1963 р. був підписаний договір про заборону ядерних іспитів в атмосфері, космічному просторі і під водою. А в 1996 р. 50 сесія Генеральної Асамблеї ООН прийняла договір про загальну заборону ядерних випробувань в атмосфері, космічному просторі і під водою. Ратифікували договір 157 країн, не ратифікували США, КНР, Ізраїль, Єгипет та Іран.

Контрольні запитання

1. Чому атомні ядра стабільні (не розпадаються)?
2. На яких відстанях діють ядерні сили?
3. Що називають дефектом маси? Що називають енергією зв'язку?
4. Запишіть співвідношення між масою і енергією?
5. Що називають ядерною реакцією?
6. Яка ядерна реакція називається ланцюговою?
7. За якою схемою відбувається реакція розпаду урану?
8. Що називають коефіцієнтом розмноження нейтронів?
9. Що називають ядерним реактором?
10. Що називають дозою поглиненого випромінювання?
11. Що називають експозиційною дозою випромінювання?
12. Що називають коефіцієнтом біологічної ефективності?
13. Що називають еквівалентною дозою поглиненого випромінювання?

23. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Приклад 1. Залежність пройденого шляху тіла від часу виражено рівнянням $S = A - Bt + Ct^2$, де $B = 3 \frac{M}{c}$, $C = 2 \frac{M}{c^2}$. Знайти швидкість і прискорення в момент часу $t = 3c$.

Розв'язання. Знайдемо швидкість тіла як похідну від шляху за часом:

$$v = \frac{d}{dt}(A - Bt + Ct^2) = -B + 2Ct = -3 + 2 \cdot 2 \cdot 3 = 9 \frac{M}{c}.$$

Знайдемо прискорення тіла як похідну від швидкості за часом:

$$a = \frac{d}{dt}(-B + 2Ct) = 2C = 2 \cdot 2 = 4 \frac{M}{c^2}.$$

$$\text{Відповідь: } v = 9 \frac{M}{c}; \quad a = 4 \frac{M}{c^2}.$$

Приклад 2. Маховик у вигляді суцільного диску масою $m = 80$ кг і радіусом $R = 50$ см почав обертатися зі сталим прискоренням під дією обертального моменту $M = 20 \frac{H}{m}$. Знайти: кутове прискорення; кінетичну енергію, якої набув маховик за $t = 10$ с від початку руху.

Розв'язання. З основного рівняння динаміки обертального руху знайдемо кутове прискорення:

$$\varepsilon = \frac{M}{I},$$

де M – обертальний механічний момент; $I = \frac{mR^2}{2}$ – момент інерції маховика.

Підставивши момент інерції у вираз для кутового прискорення, отримаємо:

$$\varepsilon = \frac{2M}{mR^2}.$$

Підставимо значення величин у одиницях СІ:

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot 20}{80 \cdot 0.5^2} = 2 \frac{\text{рад}}{c^2}.$$

Кінетичну енергію тіла, що обертається, отримуємо за формулою:

$$W^{\text{кін}} = \frac{I\omega^2}{2},$$

де кутова швидкість $\omega = \varepsilon t - \omega_0 = \varepsilon t$.

Кінетична енергія маховика:

$$W^{\text{кін}} = \frac{mR^2 \cdot \omega^2}{2 \cdot 2} = \frac{m R \cdot \varepsilon t^2}{4},$$

Підставимо значення величин у одиницях СІ:

$$W^{\text{кін}} = \frac{80 \cdot (0,5 \cdot 2 \cdot 10)^2}{4} = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж.}$$

$$\text{Відповідь: } \varepsilon = 2 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; W^{\text{кін}} = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж.}$$

Приклад 3. Скільки атомів міститься в 1 кг гелію? Знайти масу одного атома гелію.

Розв'язання. Число молекул N у заданій масі газу визначається формулою

$$N = \nu N_A = \frac{m}{\mu} N_A,$$

де $\nu = \frac{m}{\mu}$ – кількість речовини; N_A – число Авогадро; m – маса газу; μ – молярна маса.

Підставимо значення величин у формулу для числа молекул:

$$N = \frac{1 \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{4 \cdot 10^{-3}} = 1,50 \cdot 10^{26} \text{ атомів.}$$

Для знаходження маси атома потрібно розділити масу газу на число атомів:

$$m_0 = \frac{m}{N} = \frac{1}{1,5 \cdot 10^{26}} = 6,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

$$\text{Відповідь: } m_0 = \frac{m}{N} = \frac{1}{1,5 \cdot 10^{26}} = 6,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Приклад 4. Повітря, яке знаходилося при температурі $t_1 = 0^\circ\text{C}$, адіабатично стиснули так, що його об'єм зменшився у три рази. Знайти температуру повітря після стискування.

Розв'язання. Залежність між температурою та об'ємом при адіабатичному стискуванні описується рівнянням Пуассона:

$$T_1 V_1^\gamma = T_2 V_2^\gamma,$$

де T_1, V_1 – абсолютна температура та об'єм до стискування;

T_2, V_2 – після стискування; $\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{i+2}{i}$ – відношення теплоємності при постійному тиску до теплоємності при постійному об'ємі. Число ступенів вільності двохатомних молекул повітря $i = 5$. Підставимо значення γ і отримаємо:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} = 273 \cdot 3^{1,4-1} = 424\text{K}.$$

Приклад 5. У повітрі на шовковій нитці висить кулька масою $m = 5$ г. Визначити натяг нитки, якщо внизу на відстані $r = 10$ см по вертикалі розташований такий же однойменний заряд $q = 10^{-7}$ Кл.

Дано:

$$m = 5 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$r = 0,1 \text{ м}$$

$$q_1 = q_2 = 10^{-7} \text{ Кл}$$

$$k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ Нм}^2/\text{Кл}^2$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2$$

Т–?

Аналіз і розв'язання

На кульку діють три сили: ваги $m\vec{g}$, натягу нитки \vec{T} й електрична сила відштовхування \vec{F} . Спроектуємо сили на спрямовану вертикально нагору вісь OX і запишемо умову рівноваги кульки:

$$T + F - mg = 0.$$

За законом Кулона сила відштовхування

$$F = k_0 \frac{q^2}{r^2}.$$

Знайдемо силу натягу нитки

$$T = mg - k_0 \frac{q^2}{r^2}.$$

Підставимо чисельні значення:

$$T = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8 - 9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-14} / 10^{-2} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ Н}.$$

Відповідь: $T = 4 \cdot 10^{-2} \text{ Н}.$

Приклад 6. Точкові електричні заряди $q_1 = +6,7$ нКл і $q_2 = -13,2$ нКл перебувають на відстані $r = 5$ см один від одного. Чому дорівнює напруженість і потенціал електричного поля у точці А, що перебуває на відстані $r_1 = 3$ см від позитивного і $r_2 = 4$ см від негативного зарядів?

Дано:

$$q_1 = +6,7 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$q_2 = -13,2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

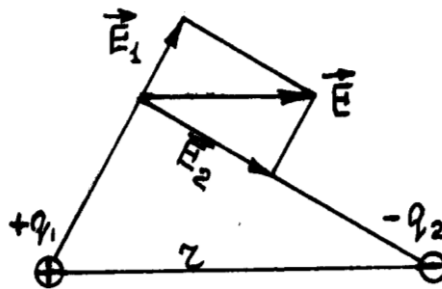
$$r = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$r_1 = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$r_2 = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$E = ?$$

Аналіз і розв'язання:



Напруженість електричного поля у точці А дорівнює векторній сумі напруженостей полів зарядів q_1 і q_2 (рисунок.)

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

Напруженості полів від зарядів q_1 і q_2 дорівнюють:

$$E_1 = \kappa_0 \frac{q_1}{r_1^2}; \quad E_2 = \kappa_0 \frac{q_2}{r_2^2}.$$

За умовою завдання кут між \vec{E}_1 і \vec{E}_2 – прямий, тоді:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} = k_0 \sqrt{\frac{q_1^2}{r_1^2} + \frac{q_2^2}{r_2^2}}.$$

Потенціал електричного поля в точці А:

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \kappa_0 \frac{q_1}{r_1} - \kappa_0 \frac{q_2}{r_2}.$$

Підставимо числові значення:

$$E = 9 \cdot 10^9 \sqrt{\left(\frac{6,7 \cdot 10^{-9}}{3 \cdot 10^{-2}}\right)^2 + \left(\frac{13,3 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 10^{-2}}\right)^2} = 1,01 \cdot 10^5 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

$$\varphi = 9 \cdot 10^9 \left(\frac{6,7 \cdot 10^{-9}}{3 \cdot 10^{-2}} + \frac{13,3 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 10^{-2}} \right) = 982 \text{ В}.$$

Відповідь: $E = 1,01 \cdot 10^5 \frac{\text{В}}{\text{м}}; \varphi = -982 \text{ В}.$

Приклад 7. Рівняння коливань точки має вигляд $x = 3 \sin \pi t$ (зміщення у сантиметрах, час у секундах). Знайти: 1) амплітуду, період коливань; 2) зміщення точки у момент часу $t = \frac{1}{6} c$; 3) максимальну швидкість та максимальне прискорення.

Розв'язання. Запишемо рівняння гармонійних коливань:

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0).$$

Порівнюючи рівняння гармонійних коливань з рівнянням коливань точки, запишемо: $A = 3$ см, $\omega = \pi c^{-1}$, $\varphi_0 = 0$.

Період коливань знайдемо за формулою:

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

Знайдемо зміщення в момент часу $t = \frac{1}{6} c$:

$$x = 3 \sin \frac{\pi}{6} = 3 \sin 30^\circ = 1,5 \text{ см.}$$

Швидкість коливань знайдемо як першу похідну від зміщення:

$$v = \frac{d}{dt} 3 \sin(\pi t) = 3\pi \cos \pi t.$$

Максимальне значення швидкості коливань при $\cos \pi t = 1$:

$$v_{\max} = 3\pi \cdot 1 \frac{cM}{c} = 9,42 \frac{cM}{c}.$$

Прискорення знайдемо як першу похідну від швидкості:

$$a = \frac{dv}{dt} = -3\pi^2 \sin \pi t.$$

Максимальне значення прискорення коливань при $\sin \pi t = 1$:

$$a_{\max} = -3\pi^2 \frac{cM}{c^2} = -29,6 \frac{cM}{c^2}.$$

Відповідь: $A = 3$ см; $T = 2c$; $x = 1,5$ см;

$$v_{\max} = 9,42 \frac{cM}{c}; \quad a_{\max} = 29,6 \frac{cM}{c^2}.$$

Приклад 8. Чому дорівнює максимальний магнітний потік Φ_m через рамку, що обертається в однорідному магнітному полі зі швидкістю $n = 20$ об/с. Рамка містить 50 витків проводу. Амплітудне значення е.р.с. дорівнює 30 В.

Дано:

$$n = 20 \text{ об/с}$$

$$N = 50 \text{ витків.}$$

$$\varepsilon_0 = 25 \text{ В}$$

$$\Phi_0 - ?$$

Аналіз і розв'язання

За законом електромагнітної індукції ЕРС:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t = BS\omega \sin \omega t = \Phi_0 \omega \sin \omega t.$$

Тут $\Phi_0 = BS$ – максимальний магнітний

потік, $\varepsilon_0 = 2\pi n NBS$.

Максимальний магнітний потік: $\Phi_0 = \frac{\varepsilon_0}{2\pi n N}$.

Виконаємо обчислення:

$$\Phi_0 = \frac{15}{2 \cdot 3,14 \cdot 20 \cdot 50} = 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ Вб.}$$

Відповідь: $\Phi_0 = 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ Вб.}$

Приклад 9. Знайти вік дерев'яного предмета, якщо питома активність ізотопу ^{14}C становить 0,6 питомої активності свіжоспиляних дерев. Період напіврозпаду ^{14}C становить 5570 років.

Дано:

$$\eta = \frac{A}{A_0} = 0,6$$

$$T_{0,5} = 5570 \text{ років}$$

$$t = ?$$

Аналіз і розв'язання:

Відношення активностей предмета і спиляних дерев:

$$\eta = \frac{A}{A_0} = \frac{\lambda N_0 e^{-\lambda t}}{\lambda N_0} = e^{-\lambda t}.$$

Знайдемо вік предмета:

$$t = \frac{\ln \eta}{\lambda},$$

де $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{0,5}}$.

$$t = \frac{\ln \eta}{\ln 2} \cdot T_{0,5} = \frac{\ln 0,6}{\ln 2} \cdot 5570 = 4,105 \cdot 10^3 \text{ років.}$$

Відповідь: $t = 4,105 \cdot 10^3 \text{ років.}$

Приклад 10. Підрахувати енергію зв'язку ядра атома алюмінію.

Дано:

$$Z = 13; N = 14$$

$$m_{\text{я}} = 26,9815 \text{ а.о.м.}$$

$$m_p = 1,0078 \text{ а.о.м.}$$

$$m_n = 1,0087 \text{ а.о.м.}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$1 \text{ а.о.м.} = 931 \text{ МеВ/с}^2$$

$$E_{\text{зв}} = ?$$

Аналіз і розв'язання

Маса нуклонів, які входять у ядро атома алюмінію, дорівнює:

$$m = Z m_p + N m_n = (13 \cdot 1,0078 + 14 \cdot 1,0087) \text{ а.о.м.} = 27,2232 \text{ а.о.м.}$$

Дефект маси ядра знайдемо за формулою:

$$\Delta m = Z m_p + N m_n - m_{\text{я}}$$

$$\Delta m = (13 \cdot 1,0078 + 14 \cdot 1,0087 - 26,9815) \text{ а.о.м.} = 0,2417 \text{ а.о.м.}$$

Енергія зв'язку дорівнює:

$$E_{\text{зв}} = \Delta m c^2 = 0,2417 \cdot 931 = 225 \text{ МеВ.}$$

Відповідь: $E_{\text{зв}} = 225 \text{ МеВ.}$

Приклад 11. Радіоактивне ядро ${}_{12}^{23}\text{Mg}$ викинуло позитрон і нейтрино. Знайти енергію β^+ -розпаду ядра.

Дано:

$$m_{\text{Mg}} = 22,99414 \text{ а.о.м.};$$

$$m_{\text{Na}} = 22,98977 \text{ а.о.м.};$$

$$m_e = 0,00055 \text{ а.о.м.}$$

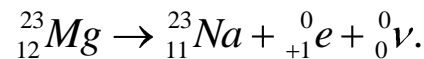
$$1 \text{ а.о.м.} = 931,49$$

$$\text{МеВ/с}^2$$

$$Q = ?$$

Аналіз і розв'язання:

Реакція розпаду ядра магнію:



Енергія розпаду:

$$Q = c^2 (m_{\text{Mg}}^{\text{я}} - m_{\text{Na}}^{\text{я}} - m_e)$$

Замінімо маси ядер масами атомів:

$$Q = c^2 (m_{\text{Mg}} - 12m_e - m_{\text{Na}} + 11m_e - m_e) =$$

$$= c^2 (m_{\text{Mg}} - m_{\text{Na}} - 2m_e).$$

Підставимо числові дані:

$$Q = (22,9414 - 22,98977 - 2 \cdot 0,00055) \cdot 931,49 =$$

$$= 3,05 \text{ МеВ.}$$

Відповідь: $Q = 3,05 \text{ МеВ.}$

24. ЗАДАЧІ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ

Механіка та молекулярна фізика

Задача 24.1. Матеріальна точка починає рухатися згідно з рівнянням $x = A_1t + B_1t^2 + C_1t^3$ де $A_1 = 4$ м/с, $B_1 = 8$ м/с², $C_1 = -4$ м/с³. Знайти швидкість та прискорення у момент часу $t = 1$ с.

Відповідь: $v = -12$ м/с; $a = -32$ м/с².

Задача 24.2. Точка рухається по колу з радіусом $R = 2$ м за законом: $s = A + Bt^2$, де $A = 2$ м, $B = -1$ м/с². Визначити нормальне, тангенціальне і повне прискорення точки в момент часу $t = 2$ с.

Відповідь: $a_n = -2$ м/с²; $a_\tau = 2$ м/с²; $a = 2,82$ м/с².

Задача 24.3. З башти висотою $h = 78,4$ м горизонтально кинули камінь зі швидкістю $v_0 = 10$ м/с. Протягом якого часу камінь перебуватиме в русі? На якій відстані s від башти він упаде?

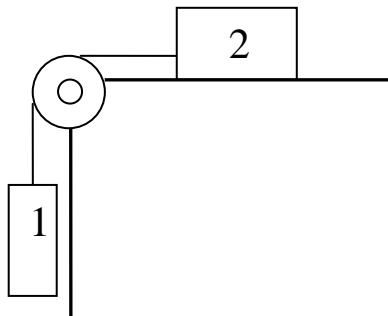
Відповідь: $t = 4$ с; $s = 40$ м.

Задача 24.4. За час $\Delta t = 1$ хв автомобіль збільшив швидкість від

$v_0 = 36$ км/год до $v = 22$ м/с. Яке прискорення a мав автомобіль і яку потужність P він розвинув при цьому, якщо його маса становила $m = 1$ т? Силу тертя не враховувати.

Відповідь: $a = 0,2$ м/с²; $P = 3,2$ кВт.

Задача 24.5. Невагомий блок закріплено на кінці стола. Наважки 1 та 2, що мають однакову масу – по 1 кг, з'єднано ниткою, що перекинута через блок. Коефіцієнт тертя наважки 2 об стіл становить 0,1. Знайти прискорення, з яким рухаються наважки і силу натягу нитки.



Відповідь: $a = 8,82$ м/с²; $T = 0,98$ Н.

Задача 24.6. Під дією сили $F = 50$ Н тіло рухається прямолінійно таким чином, що залежність пройденого тілом шляху s від часу t задається рівнянням $s(t) = 5 - 2t + 5t^2$, м. Знайти масу тіла m .

Відповідь: $m = 5$ кг.

Задача 24.7. Людина масою 60 кг біжить зі швидкістю 8 км/год назустріч візку масою 80 кг, швидкість якого становить 2,9 км/год, і стрибає на нього. Яку кінетичну енергію матиме візок?

Відповідь: $W^k = 15,9$ Дж.

Задача 24.8. Снаряд масою 10 кг мав швидкість 200 м/с у верхній точці траєкторії. У цій точці він розірвався на дві частини. Менша, масою 2 кг, набула швидкості 400 м/с у тому ж напрямку. Знайти швидкість другої, більшої частини після розриву.

Відповідь: $v = 150$ м/с.

Задача 24.9. Граната, що летить зі швидкістю $v = 5$ м/с, розірвалася на два осколки. Маса першого осколка m_1 у три рази більш за масу другого осколка m_2 . Перший осколок продовжував рухатися у попередньому напрямку зі швидкістю $v_1 = 15$ м/с. Знайти швидкість v_2 меншого осколка.

Відповідь: $v_2 = -25$ м/с.

Задача 24.10. Колесо радіусом 30 см і масою 3 кг скочується по похилій площині довжиною 5 м із кутом нахилу 30° . Швидкість у кінці руху становила 4,6 м/с. Визначити момент інерції колеса.

Відповідь: $I = 12,7$ кг/м².

Задача 24.11. Знайти роботу A , котру потрібно здійснити, щоб збільшити швидкість тіла масою $m = 1$ кг від $v_1 = 2$ м/с до $v_2 = 6$ м/с на шляху $s = 10$ м. На всьому шляху діє сила тертя $F_m = 2$ Н.

Відповідь: $A = 36$ Дж.

Задача 24.12. Ковзаняр, що має масу $m = 70$ кг, кидає в горизонтальному напрямку камінь масою $m_1 = 3$ кг зі швидкістю $v = 8$ м/с. На яку відстань s відкотиться ковзаняр, якщо коефіцієнт тертя ковзанів об лід становить $\mu = 0,02$?

Відповідь: $s = 0,588$ м.

Задача 24.13. Колесо обертається з кутовим прискоренням $\varepsilon = 2 \text{ с}^{-2}$. Через час $t = 5 \text{ с}$ після початку руху нормальне прискорення колеса набуло величини $a_n = 2 \text{ м/с}^2$. Визначити радіус колеса R .

Відповідь: $R = 0,02 \text{ м}$.

Задача 24.14. Точка рухається по колу радіусом $R = 4 \text{ м}$. Закон її руху описує рівняння $s = A + Bt^2$, де $A = 8 \text{ м}$, $B = -2 \text{ м/с}^2$. Визначити момент часу t , коли нормальне прискорення a_n точки дорівнює 9 м/с^2 . Знайти швидкість v , тангенціальне a_τ і повне a прискорення точки в той же момент часу.

Відповідь: $1,5 \text{ с}$; -6 м/с ; -4 м/с^2 ; $9,84 \text{ м/с}^2$;

Задача 24.15. Дві матеріальні точки рухаються згідно з рівнянням $x_1 = A_1t + B_1t^2 + C_1t^3$ та $x_2 = A_2t + B_2t^2 + C_2t^3$, де $A_1 = 4 \text{ м/с}$, $B_1 = 8 \text{ м/с}^2$, $C_1 = -16 \text{ м/с}^3$, $A_2 = 2 \text{ м/с}$, $B_2 = -4 \text{ м/с}^2$, $C_2 = 1 \text{ м/с}^3$. У який момент часу t прискорення цих точок будуть однакові? Знайти швидкості точок v_1 і v_2 у цей момент.

Відповідь: $0,235 \text{ с}$; $5,1 \text{ м/с}$; $0,286 \text{ м/с}$.

Задача 24.16. На поверхні горизонтального диска, який може обертатися навкруги вертикальної осі, прокладені по колу радіусом $r = 50 \text{ см}$ рейки дитячої залізниці. Маса диска $M = 10 \text{ кг}$, його радіус $R = 60 \text{ см}$. На рейки нерухомого диска було поставлено заводний паровоз масою $m = 1 \text{ кг}$. Він почав рухатись відносно рейок зі швидкістю $v = 0,8 \text{ м/с}$. З якою кутовою швидкістю обертатиметься диск?

Відповідь: $\omega = 0,195 \text{ с}^{-1}$.

Задача 24.17. Платформа у вигляді диска обертається за інерцією навкруги вертикальної осі з частотою $n_1 = 14 \text{ хв}^{-1}$. На краю платформи стоїть людина. Коли вона перейшла у центр платформи, частота виросла до $n_2 = 25 \text{ хв}^{-1}$. Маса людини $m = 70 \text{ кг}$. Визначити масу платформи. Момент інерції людини розраховувати як для матеріальної точки.

Відповідь: $m = 210 \text{ кг}$.

Задача 24.18. Куля скочується з похилої площини висота якої дорівнює $h = 90$ см. Яку лінійну швидкість матиме центр кулі у той момент, коли вона скотиться з площини?

Відповідь: $3,55 \text{ м/с}$.

Задача 24.19. Куля масою $m_1 = 10$ кг стикається з кулею масою $m_2 = 4$ кг. Швидкість першої кулі $v_1 = 4$ м/с, другої – $v_2 = 12$ м/с. Знайти загальну швидкість u куль після удару у двох випадках:

1) мала куля наздоганяє велику, яка рухається у тому ж напрямку;
2) кулі рухаються назустріч одна одній. Удар вважати прямим, центральним, непружним.

Відповідь: $6,28 \text{ м/с}$; $-0,572 \text{ м/с}$.

Задача 24.20. Колесо з радіусом $R = 1$ м обертається так, що залежність кута повороту спиці колеса від часу t описує рівняння $\varphi(t) = 5 + 2t + t^3$, рад. Визначити кутове ε , тангенціальне a_τ і нормальне a_n прискорення точок на ободі колеса через період часу $t = 2$ с після початку руху.

Відповідь: 12 с^{-2} ; 12 м/с^2 ; 196 м/с^2 .

Задача 24.21. Куля, що рухалася горизонтально, зіткнулася з нерухомою кулею і передала їй 64 % своєї кінетичної енергії. Кулі абсолютно пружні, удар прямий, центральний. У скільки разів маса другої кулі більша за масу першої?

Відповідь: у 4 рази.

Задача 24.22. Циліндр, розташований горизонтально, може обертатися горизонтально навколо осі, що збігається з віссю циліндра. Маса циліндра $m_1 = 12$ кг. На циліндр намотали шнур, до якого прив'язали гирю масою $m_2 = 1$ кг. З яким прискоренням буде опускатися гиря? Яка сила натягу шнура під час руху гирі?

Відповідь: $1,4 \text{ м/с}^2$.

Задача 24.23. Через блок, виконаний у вигляді колеса, перекинута нитка, до кінців якої прив'язані гирі з масами $m_1 = 100$ г і $m_2 = 300$ г. Маса колеса $M = 200$ г вважати рівномірно розподіленою по ободу, масою спиць знехтувати. Визначити прискорення гирь і сили натягу нитки по обидві сторони блоку.

Відповідь: $3,27 \text{ м/с}^2$; $1,31 \text{ Н}$; $1,96 \text{ Н}$.

Задача 24.24. Двом однаковим маховикам, що перебувають у стані спокою, надали однакову кутову швидкість $\omega = 63$ рад/с і залишили їх самих по собі. Під дією сил тертя маховик зупинився через одну хвилину, а другий зробив до повної зупинки $N = 360$ об. У якого маховика гальмівний момент був більшим і у скільки разів?

Відповідь: в 1,2 рази.

Задача 24.25. З якою швидкістю v рухається стрічка конвеєру, якщо його колесо діаметром $d = 1$ м обертається з частотою $n = 6$ об/хв?

Відповідь: 0,314 м/с.

Задача 24.26. Куля масою 10 кг, що рухається зі швидкістю 14,4 км/год, стикається з кулею масою 4 кг, швидкість якої дорівнює 12 м/с. Вважаючи удар прямим і непружним, знайти кінетичну енергію куль після удару, якщо кулі рухаються назустріч одна одній.

Відповідь: 2,3 Дж.

Задача 24.27. Горизонтальна платформа масою 80 кг і радіусом 1 м обертається з частотою 20 об/хв. У центрі платформи стоїть людина і тримає у розставлених руках гирі. З якою частотою обертатиметься платформа, якщо людина, опустивши руки, зменшить свій момент інерції від $2,92$ кг·м² до $0,98$ кг·м². Вважати платформу однорідним диском.

Відповідь: 20,96 об/хв.

Задача 24.28. Однорідний диск радіусом 0,2 м і масою 5 кг, обертається навкруги осі, що проходить через його центр, перпендикулярно до його площини. Залежність кутової швидкості обертання диска від часу задається рівнянням: $\omega(t) = 3 + 8t$ рад/с. Знайти дотичну силу, прикладену до обода диска.

Відповідь: $F = 4H$.

Задача 24.29. Визначити момент інерції I тонкого стрижня довжиною 30 см і масою $m = 0,5$ кг відносно осі, яка проходить через один з його кінців.

Відповідь: $I = 0,015 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Задача 24.30. Визначити лінійну швидкість центра мас кулі, яка скотилася з похилої площини висотою 1 м.

Відповідь: $3,74 \text{ м/с}$.

Задача 24.31. Однорідний стрижень довжиною 1 м і масою 0,5 кг обертається навкруги вертикальної осі, що проходить через кінець стрижня. З яким кутовим прискоренням обертається стрижень, якщо на нього діє момент сил, що дорівнює $0,1 \text{ Н}\cdot\text{м}$?

Відповідь: $0,6 \text{ рад/с}^2$.

Задача 24.32. Знайти силу тяги на гаку трактора, якщо прискорення трактора $a = 0,2 \text{ м/с}^2$. Маса причепа $m = 0,5 \text{ т}$, сила опору руху $F_{on} = 1,5 \text{ кН}$.

Відповідь: $F = 1,6 \text{ кН}$.

Задача 24.33. Трактор масою $m = 3340 \text{ кг}$ рухається по випуклому мосту зі швидкістю $v = 9 \text{ км/год}$. Знайти силу тиску на міст у верхній частині, якщо радіус кривизни моста $R = 146 \text{ м}$.

Відповідь: $F = 32,6 \text{ кН}$.

Задача 24.34. Для підйому зерна на висоту $h = 10 \text{ м}$ установили транспортер з мотором потужністю $N = 4 \text{ кВт}$. Знайти ККД транспортера, якщо за час $t = 2 \text{ ч}$ піднято зерно масою $m = 40 \text{ т}$.

Відповідь: $\eta = 13,6\%$.

Задача 24.35. Знайти момент сили, який діє на якір електродвигуна потужністю 1 кВт, якщо він обертається з частотою $n = 12 \text{ с}^{-1}$.

Відповідь: $F = -13,3 \text{ Нм}$.

Задача 24.36. Знайти частоту обертання махового колеса у вигляді суцільного диска радіусом $R = 0,1 \text{ м}$ і масою $m = 5 \text{ кг}$, якщо під дією гальмуючого моменту $M = -2 \text{ Нм}$ він спинився через час $t = 5 \text{ с}$.

Відповідь: $63,7 \text{ с}^{-1}$.

Задача 24.37. Молотильний барабан, момент інерції якого $I = 20 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, обертається з частотою $n = 20 \text{ с}^{-1}$. Знайти час до повної зупинки барабана під дією гальмуючого моменту $M = -12,6 \text{ Нм}$.

Відповідь: 3 хв 20 с.

Задача 24.38. З якою силою натягується біцепс (м'яз) при підйомі ядра масою 8 кг, якщо відстань від центру ядра до ліктя 32 см, а від ліктя до міста кріплення м'яза 4 см?

Відповідь: $F = 627,2 \text{ Н}$.

Задача 24.39. Кінетична енергія кулі, яка котиться без ковзання по горизонтальній поверхні дорівнює 14 Дж. Знайти кінетичну енергію поступального й обертального руху.

Відповідь: 10 Дж; 4 Дж.

Задача 24.40. Велосипедне колесо з масою $m = 5 \text{ кг}$ і радіусом 0,2 м обертається зі швидкістю $n = 0,5 \text{ с}^{-1}$. Знайти момент інерції та момент імпульсу.

Відповідь: $I = 0,1 \text{ кгм}^2$; $L = 3,14 \text{ кгм}^2/\text{с}$.

Задача 24.41. Підрахувати момент інерції тонкого диску з масою $m = 2 \text{ кг}$ і радіусом $R = 0,2 \text{ м}$, відносно осі, яка проходить через середину радіуса.

Відповідь: $I = 0,05 \text{ кгм}^2$;

Задача 24.42. У балоні міститься газ при температурі $100 \text{ }^\circ\text{C}$. До якої температури потрібно нагріти газ, щоб його тиск зріс у два рази?

Відповідь: $473 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача 24.43. У балоні міститься 5 кг ідеального газу під тиском $p_1 = 10 \text{ МПа}$. Яку масу газу взяли з балона, якщо тиск зріс до $p_2 = 2,5 \text{ МПа}$. Температуру газу вважати сталою.

Відповідь: 1,25 кг.

Задача 24.44. Газ має густину $\rho = 0,34 \text{ кг/м}^3$ при температурі $10 \text{ }^\circ\text{C}$ і тиску $p = 200 \text{ кПа}$. Знайти молярну масу газу.

Відповідь: 0,004 кг/моль.

Задача 24.45. У скільки разів густина ρ_1 повітря, що заповнює приміщення взимку ($t_1 = 7^\circ\text{C}$), більша за його густину ρ_2 влітку ($t_2 = 37^\circ\text{C}$)? Тиск газу вважати сталим.

Відповідь: в 1,1 *раза*.

Задача 24.46. Густина газу у посудині при тискові 80 *кПа* становить 0,5 *кг/м³*. Чому дорівнює середня арифметична швидкість молекул?

Відповідь: $v = 638 \text{ м/с}$.

Задача 24.47. На якій висоті тиск повітря буде становити 75 % від тиску на рівні моря? Температуру вважати сталою, що дорівнює 0°C . Молярна маса повітря $M = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, $\ln 0,75 = -0,288$.

Відповідь: 5,3*км*.

Задача 24.48. Знайти середню квадратичну швидкість молекул повітря за нормальних умов. Середній діаметр молекул повітря $\sigma = 0,3 \text{ нм}$.

Відповідь: 93*нм*.

Задача 24.49. Гідроген займає об'єм $V = 10 \text{ м}^3$ при тиску $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$. Його нагріли при сталому об'ємі до тиску $p_2 = 0,3 \text{ МПа}$. Визначити зміну ΔU внутрішньої енергії, роботу A і кількість теплоти Q , наданої газу.

Відповідь: 5*МДж*; 0; 5*МДж*.

Задача 24.50. Об'єм кисню під час нагрівання збільшується від $V_1 = 1 \text{ м}^3$ до $V_2 = 3 \text{ м}^3$ зі сталим тиском $p = 80 \text{ кПа}$. Визначити зміну ΔU внутрішньої енергії кисню, роботу A , здійснену ним при розширенні, а також теплоту Q , надану газу.

Відповідь: 400*кДж*; 160*кДж*; 560*кДж*.

Задача 24.51. Газ здійснює ідеальний цикл Карно. Температура нагрівача у три рази вища за температуру холодильника. Нагрівач передав газу $Q_1 = 41,9 \text{ кДж}$ теплоти. Яку роботу здійснив газ?

Відповідь: 28,1*кДж*.

Задача 24.52. У циліндрі під поршнем розміщений нітроген (азот), який має масу 0,6 кг і займає об'єм $V_1 = 1,2 \text{ м}^3$ при температурі $T_1 = 560 \text{ К}$. У результаті нагріву газ розширився і зайняв об'єм $V_2 = 4,2 \text{ м}^3$, при цьому температура не змінилась. Знайти зміну ΔU внутрішньої енергії газу, здійснену ним роботу A і теплоту Q , надану газу.

Відповідь: 0; 126кДж; 126кДж.

Задача 24.53. Знайти середню довжину вільного пробігу молекули гідрогену при $p = 0,133 \text{ Па}$ і температурі $= 50^\circ\text{С}$.

Відповідь: 14,2см.

Задача 24.54. Газ здійснює ідеальний цикл Карно. Температура нагрівача у три рази вища за температуру холодильника. Нагрівач передав газу $Q_1 = 41,9 \text{ кДж}$ теплоти. Яку роботу здійснив газ?

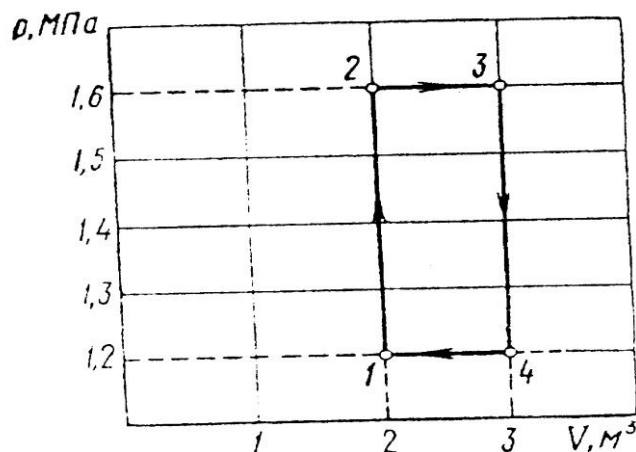
Відповідь: 28,1кДж.

Задача 24.55. Знайти середній діаметр капіляра ґрунту, якщо вода піднімається у ньому на висоту $\Delta h = 49 \text{ мм}$.

Відповідь: 0,6мм.

Задача 24.56. Один кіломоль двоатомного ідеального газу здійснює замкнутий цикл, графік якого зображений на рисунку. Визначити: теплоту Q_1 , одержану від нагрівача; теплоту Q_2 , передану холодильнику; роботу A , здійснювану газом за один цикл; термічний ККД циклу.

Відповідь: 7,61МДж; 7,19МДж;
0,42МДж, 5,3%.



Задача 24.57. У бензиновому двигуні ступінь стискання горючої суміші становить 6,2. Суміш надходить у циліндр при температурі $t_1 = 15^\circ\text{C}$. Знайти температуру t_2 горючої суміші в кінці такту стискання. Горючу суміш розглядати як двоатомний ідеальний газ; процес вважати адіабатним.

Відповідь: 324°C .

Задача 24.58. Знайти градієнт густини вуглекислого газу у ґрунті, якщо через площу $I = 1\text{ м}^2$ її поверхні за час 1с в атмосферу пройшов газ масою $m = 8 \cdot 10^{-8}$ кг. Коефіцієнт дифузії $D = 0,04\text{см}^2/\text{с}$.

Відповідь: 72см .

Задача 24.59. Знайти товщину суглинистого ґрунту, якщо за час $t = 5$ год через площу $S = 1\text{ м}^2$ поверхні проходить теплота $Q = 250$ кДж. Температура на поверхні ґрунту $t_1 = 25^\circ\text{C}$; у нижньому шарі ґрунту $t_2 = 15^\circ\text{C}$.

Відповідь: $0,02\text{кг}/\text{м}^4$.

Задача 24.60. Скільки теплоти пройде крізь площу $S = 1\text{ м}^2$ поверхні піску за час $t = 1$ год, якщо температура на його поверхні $t_1 = 20^\circ\text{C}$, а на глибині $h = 0,5$ м температура $t_2 = 10^\circ\text{C}$?

Відповідь: $48,3\text{кДж}$.

Електрика та магнетизм

Задача 24.61. Два точкових заряди перебувають у вакуумі на відстані $r = 0,3$ м і взаємодіють із силою $F = 30$ Н. Величина одного заряду в три рази більша від другого – $q_2 = 3q_1$. Визначити величину кожного заряду.

Відповідь: $q_1 = 10^{-5}\text{ Кл}$; $q_2 = 3 \cdot 10^{-5}\text{ Кл}$.

Задача 24.62. Дві однакових кульки, маси яких $m = 0,5$ г, підвішені на нитках довжиною $\ell = 1$ м. Кульки мають заряди $q_1 = q_2 = 4 \cdot 10^{-9}\text{ Кл}$. На яку відстань розійшлися кульки?

Відповідь: $r = 4\text{ см}$.

Задача 24.63. Два точкових заряди $q_1 = +10^{-8}$ Кл і $q_2 = +4 \cdot 10^{-7}$ Кл перебувають на відстані $r = 24$ см один від одного. Де потрібно помістити третій заряд, щоб система перебувала у рівновазі?

Відповідь: $x = 0,08$ м.

Задача 24.64. Чому дорівнює величина точкового заряду, якщо на відстані $r = 4$ м у гасі ($\varepsilon = 2$) напруженість електричного поля $E = 90$ В/м?

Відповідь: $q = 3,2 \cdot 10^{-7}$ Кл.

Задача 24.65. Визначити напруженість і потенціал у точці, що перебуває посередині між зарядами $q_1 = 2 \cdot 10^{-7}$ Кл і $q_2 = -4 \cdot 10^{-7}$ Кл. Заряди перебувають у скипидарі ($\varepsilon = 2,2$) на відстані 10 см один від одного.

Відповідь: $E = 9,9 \cdot 10^5$ В/м; $\varphi = -18$ кВ/м.

Задача 24.66. Напруженість електричного поля в деякій точці простору $E = 3 \cdot 10^{+4}$ В/м. Яка сила діє на заряд $q_2 = 4 \cdot 10^{-9}$ Кл?

Відповідь: $F = 1,2 \cdot 10^{-4}$ Н.

Задача 24.67. Чому дорівнює потенціал електричного поля в точці, де потенціальна енергія електрона $W_n = 8 \cdot 10^{-16}$ Дж?

Відповідь: $\varphi = -5 \cdot 10^3$ В.

Задача 24.68. Заряджена порошина $m = 2 \cdot 10^{-8}$ кг перебуває в рівновазі між пластинами (обкладинками) повітряного конденсатора. Різниця потенціалів $\varphi_1 - \varphi_2 = 5 \cdot 10^3$ В, відстань між пластинами $d = 2,5$ см. Чому дорівнює заряд порошини?

Відповідь: $q = 9,8 \cdot 10^{-16}$ Кл.

Задача 24.69. Яку роботу виконує електричне поле при переміщенні заряду 20 нКл з точки з потенціалом 700 В у точку з потенціалом 200 В? З точки з потенціалом -100 В у точку з потенціалом 400 В?

Відповідь: 10 мкДж; -10 мкДж.

Задача 24.70. На скільки зміниться потенціальна енергія взаємодії зарядів 25 нКл і 4 нКл при зміні відстані між ними з 10 до 20 см ?

Відповідь: збільшиться на $4,5 \text{ мкДж}$.

Задача 24.71. Електрон, рухаючись під дією електричного поля, збільшив свою швидкість із 10 до 30 Мм/с . Знайдіть різницю потенціалів між початковою і кінцевою точками переміщення.

Відповідь: $2,3 \text{ кВ}$.

Задача 24.72. Конденсатор ємністю C_1 зарядили до напруги $U_1 = 500 \text{ В}$. При паралельному підключенні цього конденсатора до незарядженого конденсатора ємністю $C_2 = 4 \text{ мкФ}$ вольтметр показав $U_2 = 100 \text{ В}$. Чому дорівнює ємність C_1 ?

Відповідь: $C_1 = 1 \text{ мкФ}$.

Задача 24.73. Знайдіть індукцію B магнітного поля в точці, що перебуває у повітрі на відстані $r = 9,2 \text{ см}$ від прямолінійного провідника зі струмом силою $I = 13,8 \text{ А}$.

Відповідь: $B = 3 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$.

Задача 24.74. По двох прямолінійних паралельних провідниках великої довжини течуть струми силою $I_1 = 24 \text{ А}$ та $I_2 = 16 \text{ А}$. Провідники перебувають у повітрі на відстані $r = 0,2 \text{ м}$ один від одного. Знайдіть геометричне місце точок, у яких індукція магнітного поля дорівнює нулю: а) для однакових напрямків струмів у провідниках; б) для протилежних напрямків струмів у провідниках.

Відповідь: а) між провідниками на відстані $0,08 \text{ м}$ від струму в 16 А ; б) на відстані $0,4 \text{ м}$ від струму в 16 А .

Задача 24.75. На прямолінійний провідник довжиною $l = 0,4 \text{ м}$, що розташований під кутом $\alpha = 23^\circ$ до ліній індукції магнітного поля, діє сила $F = 8 \text{ Н}$. Визначити індукцію магнітного поля, якщо по провіднику тече струм силою $I = 20 \text{ А}$.

Відповідь: $B = 2,56 \text{ Тл}$.

Задача 24.76. На провідник довжиною $l = 0,15$ м в однорідному магнітному полі з напруженістю $H = 1000$ А/м діє сила $F = 2 \cdot 10^{-3}$ Н. Визначити кут між напрямком магнітного потоку і напрямком струму в провіднику, якщо по провіднику тече струм $I = 50$ А.

Відповідь: $\sin\alpha = 0,21$; $\alpha = \arcsin 0,21 \approx 120$.

Задача 24.77. Паралельні провідники, розташовані на відстані 6,4 см, один від одного, притягуються із силою $F = 2,5 \cdot 10^{-2}$ Н. Визначити силу струму I у провідниках, якщо довжина кожного з них $l = 3,2$ м.

Відповідь: $I = 50$ А.

Задача 24.78. З якою силою магнітне поле з індукцією 10 мТл діє на провідник, у якому сила струму 50 А, якщо довжина активної частини провідника $0,1$ м? Поле і струм взаємно перпендикулярні.

Відповідь: 50 мН.

Задача 24.79. Магнітний потік усередині контуру, площа поперечного перерізу якого 60 см², дорівнює $0,3$ мВб. Знайти індукцію поля усередині контуру. Поле вважати однорідним.

Відповідь: 50 мТл.

Задача 24.80. Яка величина магнітного потоку, що пронизує плоску поверхню площею 50 см² при індукції поля $0,4$ Тл, якщо поверхня перпендикулярна вектору B ?

Відповідь: 2 мВб.

Задача 24.81. Визначити ЕРС індукції, що виникає на кінцях провідника довжиною $l = 0,2$ м, що рухається під кутом $\alpha = 30^\circ$ до напрямку магнітного поля з індукцією $B = 0,1$ Тл зі швидкістю $v = 0,5$ м/с.

Відповідь: $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-3}$ В.

Задача 24.82. Визначити індукцію магнітного поля в котушці довжиною $l = 0,3$ м, що містить $n = 50$ витків проводу, при силі струму $I = 2$ А.

Відповідь: $B = 4,2 \cdot 10^{-4}$ Тл.

Задача 24.83. Провідник рухається в сталому магнітному полі з індукцією $B = 4 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$ із швидкістю $v = 15 \text{ м/с}$ під кутом 90° до силових ліній. Визначите довжину провідника, якщо на його кінцях виникає ЕРС індукції 30 мВ .

Відповідь: $l = 0,05 \text{ м}$.

Задача 24.84. Літак летить горизонтально зі швидкістю 900 км/год . Відстань між кінцями крил $l = 50 \text{ м}$, вертикальна складова магнітного поля Землі $B = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$. Визначити різницю потенціалів між кінцями крил.

Відповідь: $U = 0,625 \text{ В}$.

Задача 24.85. Якою повинна бути швидкість зміни струму в обмотці електромагніту з індуктивністю $L = 0,2 \text{ Гн}$, щоб середнє значення ε_c дорівнювало 20 В ?

Відповідь: $\Delta I / \Delta t = 10 \text{ А/с}$.

Задача 24.86. За 5 мс у соленоїді, що містить 500 витків проводу магнітний потік рівномірно зменшується із 7 до 9 мВб . Знайти ЕРС індукції в соленоїді.

Відповідь: 400 В .

Задача 24.87. Через соленоїд, індуктивність якого $0,4 \text{ Гн}$ і площа поперечного перерізу 10 см^2 , проходить струм $0,5 \text{ А}$. Яка індукція поля усередині соленоїда, якщо він містить 100 витків? Поле вважати однорідним.

Відповідь: 2 мТл .

Задача 24.88. Знайти ЕРС індукції у провіднику з довжиною активної частини $0,25 \text{ м}$, що переміщається в однорідному магнітному полі з індукцією 8 мТл зі швидкістю 5 м/с під кутом 30° до вектора магнітної індукції.

Відповідь: 5 мВ .

Задача 24.89. У котушці з індуктивністю $0,6 \text{ Гн}$ сила струму дорівнює 20 А . Яка енергія магнітного поля цієї котушки? Як зміниться енергія поля, якщо сила струму зменшиться вдвічі?

Відповідь: 120 Дж ; зменшиться в 4 рази.

Задача 24.90. Знайти ЕРС індукції в провіднику довжиною 0,25 м, що переміщується в однорідному магнітному полі з індукцією 8 мТл із швидкістю 5 м/с під кутом 30° до вектора магнітної індукції.

Відповідь: 5 мВ.

Задача 24.91. Знайти ЕРС індукції у провіднику з довжиною активної частини 0,5 м, що переміщується в однорідному магнітному полі з індукцією 8 мТл зі швидкістю 5 м/с під кутом 30° до вектора магнітної індукції.

Відповідь: 10 мВ.

Задача 24.92. Довжина мідних проводів $l_1 = 60$ см, $l_2 = 3$ м. У якого з проводів опір більший і у скільки разів, якщо площі перетину проводів $S_2 = 2S_1$?

Відповідь: $R_2 = 2,5 R_1$.

Задача 24.93. Площі поперечного перерізу мідних проводів $S_1 = 0,1$ см², $S_2 = 2$ мм². Опір першого провідника $R_1 = 2$ Ом. Знайдіть опір R_2 другого провідника.

Відповідь: $R_2 = 10$ Ом.

Задача 24.94. Чому дорівнює опір мідного провідника вагою $P = 40$ Н і діаметром $D = 1,4$ мм? ($d = 8,9 \cdot 10^3$ кг/м³, $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м).

Відповідь: $R = 3$ Ом.

Задача 24.95. Який заряд q пройде через резистор за час $t = 1$ год, якщо сила струму в електричному колі $I = 250$ мА?

Відповідь: $q = 900$ Кл.

Задача 24.96. Чому дорівнює довжина l мідного провідника діаметром $d = 0,8$ мм, якщо при різниці потенціалів $U = 1,4$ В по ньому іде струм силою $I = 0,8$ А?

Відповідь: $l = 50$ м.

Задача 24.97. Опір мідного провідника при температурі $t_1 = 15^\circ\text{C}$ дорівнює $R_1 = 58$ Ом. Визначити його опір при температурі $t_2 = 30^\circ\text{C}$.

Відповідь: $R_2 = 70$ Ом.

Задача 24.98. Провідники з опорами $R_1 = 10 \text{ Ом}$ і $R_2 = 20 \text{ Ом}$ з'єднані паралельно і підключені до джерела постійного струму. У першому провіднику виділилася кількість теплоти $Q_1 = 100 \text{ Дж}$. Яка кількість теплоти Q_2 виділиться за той самий час t у другому провіднику?

Відповідь: $Q_2 = 50 \text{ Дж}$.

Задача 24.99. Опір $R_1 = 9 \text{ Ом}$, $R_2 = 12 \text{ Ом}$, $R_3 = 3 \text{ Ом}$ з'єднані послідовно. Чому дорівнює струм у ланцюгу і спадання напруги на кожному, якщо напруга $U = 120 \text{ В}$.

Відповідь: $I = 5$; $U_1 = 45 \text{ В}$; $U_2 = 60 \text{ В}$; $U_3 = 15 \text{ В}$.

Задача 24.100. Підключений клемми до джерела струму вольтметр показує $U_1 = 10 \text{ В}$ при зовнішньому опорі $R_1 = 5 \text{ Ом}$, а при опорі $R_2 = 12 \text{ Ом}$ напруга $U_2 = 12 \text{ В}$. Чому дорівнює ЕРС і внутрішній опір r джерела струму?

Відповідь: $\varepsilon = 14 \text{ В}$; $r = 2 \text{ Ом}$.

Задача 24.101. Який резистор R_2 потрібно з'єднати паралельно із провідником $R_1 = 300 \text{ Ом}$, щоб загальний опір становив 120 Ом ?

Відповідь: $R_2 = 200 \text{ Ом}$.

Задача 24.102. Чому дорівнює маса m мідного провідника довжиною $l = 10 \text{ км}$, якщо його опір $R = 29 \text{ Ом}$?

Відповідь: $m = 521 \text{ кг}$.

Задача 24.103. ЕРС джерела струму $\varepsilon = 3,5 \text{ В}$, внутрішній опір $r = 0,8 \text{ Ом}$. У коло послідовно включені резистори $R_1 = 3,0 \text{ Ом}$ і $R_2 = 3,2 \text{ Ом}$. Опір проводів, що підводять струм, $R = 0,8 \text{ Ом}$. Визначити силу струму I у колі.

Відповідь: $I = 0,5 \text{ А}$.

Задача 24.104. ЕРС джерела струму $\varepsilon = 3 \text{ В}$, внутрішній опір $r = 0,8 \text{ Ом}$. У ланцюг паралельно включені резистори $R_1 = 3 \text{ Ом}$, $R_2 = 6 \text{ Ом}$. Опір проводів, що підводять струм, $R = 1,2 \text{ Ом}$. Визначити силу струму I_2 у другому опорі.

Відповідь: $I_2 = 0,25 \text{ А}$.

Задача 24.105. По провіднику опором $R = 6\text{ Ом}$ за час $t = 2$ хв пройшло $q = 200$ Кл електрики. Скільки виділилося теплоти?

Відповідь: $Q = 2$ кДж.

Задача 24.106. Два провідники з однаковими опорами підключили до джерела постійного струму спочатку паралельно, а потім послідовно. У якому випадку споживається більша потужність і в скільки разів?

Відповідь: при паралельному в 4 рази.

Задача 24.107. При електролізі розчину сірчанокислого срібла протягом $t = 10$ хв виділилося $m = 3,5$ г срібла. Визначити величину опору, включеного послідовно з ванною, у якій відбувається електроліз, якщо спадання напруги на цьому опорі $U = 10$ В. Електрохімічний еквівалент міді $k = 0,34$ мг/Кл.

Відповідь: $R = 0,6$ Ом.

Задача 24.108. Який додатковий опір необхідно приєднати до вольтметра, внутрішній опір якого 5 кОм, щоб граничне значення вимірюваного вольтметром напруги збільшилося в 5 разів?

Відповідь: 20 кОм.

Задача 24.109. По провіднику опором $R = 6\text{ Ом}$ за час $t = 4$ хв пройшло $q = 200$ Кл електрики. Скільки виділилося теплоти?

Відповідь: $Q = 4$ кДж.

Задача 24.110. Сила струму у колі, яке складається з термопар з опором $r_1 = 4\text{ Ом}$ і гальванометра опором $r_2 = 80\text{ Ом}$, дорівнює 26 мкА при різниці температур спаїв $\Delta t = 50^\circ\text{C}$. Знайти постійну термопар.

Відповідь: 44 мкВ/ $^\circ\text{C}$.

Коливання та хвилі. Змінний струм

Задача 24.111. Запишіть рівняння коливань маятника з амплітудою $A = 1$ см, циклічною частотою $\omega_0 = 2\pi/T$, якщо в момент часу $T = 0$ зсув точки $x = A$.

Задача 24.112 Середня швидкість руху поршня парової машини 4,0 м/с. Хід поршня 50см. Визначити частоту коливань поршня.

Відповідь: $\nu = 8 \text{ с}^{-1}$.

Задача 24.113. Матеріальна точка здійснює коливання за законом $x = A \cos(\omega_0 t + 0,5\pi)$ м. Визначити амплітуду, період і початкову фазу коливання.

Відповідь: $A = 1\text{м}, T = 2\text{с}, \alpha = 0,5\pi$.

Задача 24.114. У який найближчий момент часу t від початку гармонійного коливання зсув дорівнюватиме половині амплітуди?

Відповідь: $t = 4\text{с}$.

Задача 24.115. За однаковий час один маятник зробив п'ять коливань, а другий – три. Чому дорівнює довжина кожного маятника, якщо різниця довжин $\Delta l = 0,48 \text{ м}$?

Відповідь: $l_1 = 0,27\text{м}, l_2 = 0,75\text{м}$.

Задача 24.116. У скільки разів зміниться період коливань математичного маятника на Місяці? Прискорення вільного падіння на Місяці $a = 1,6 \text{ м/с}^2$.

Відповідь: зміниться \approx у 2,5 рази.

Задача 24.117. Чому дорівнює швидкість океанської хвилі довжиною $\lambda = 270 \text{ м}$ і періодом 13,5 с?

Відповідь: $v = 20 \text{ м/с}$.

Задача 24.118. Звук дійшов до спостерігача через 6с після спалаху блискавки. Яка відстань від спостерігача до блискавки?

Відповідь: 2 км.

Задача 24.119. Швидкість хвиль на поверхні води $v = 2,4\text{м/с}$, частота коливань $\nu = 3\text{Гц}$. Чому дорівнює різниця фаз $\Delta\varphi$ двох точок, які перебувають на відстані $\Delta x = 0,2\text{м}$.

Відповідь: $\Delta\varphi = \pi/2$.

Задача 24.120. Якій довжині хвилі відповідає частота звукових коливань $\nu = 20 \text{ Гц}$? Швидкість звуку 330м/с.

Відповідь: $\lambda = 16,5\text{м}$.

Задача 24.121. Скільки часу поширюється звук між залізничними станціями ($S = 16,6$ км) по повітряю? По рейках? Швидкість звуку в повітрі $v_n = 332$ м/с, у сталі $v_c = 5,5$ км/с. Температура повітря 0° С.

Відповідь: $t_g = 50$ с; $t_c = 3$ с.

Задача 24.122. Чому дорівнює глибина моря, якщо імпульс сонара повернувся через 0,2с після відправлення? Швидкість ультразвуку в морській воді дорівнює 1500 м/с.

Відповідь: 150м.

Задача 24.123. У скільки разів зміниться частота коливань автомобіля на ресорах після прийняття вантажу, що дорівнює масі порожнього автомобіля?

Відповідь: Зменшиться у $\sqrt{2}$ разів.

Задача 24.124. Швидкість хвиль на поверхні води $v = 2,4$ м/с, частота коливань $\nu = 3$ Гц. Чому дорівнює різниця фаз $\Delta\varphi$ двох точок, які перебувають на відстані $\Delta x = 0,4$ м.

Відповідь: $\Delta\varphi = \pi$.

Задача 24.125. Як співвідносяться довжини математичних маятників, якщо за той самий час один з них робить 10, а другий – 30 коливань?

Відповідь: 9:1.

Задача 24.126. Вантаж масою 400 г здійснює коливання на пружині жорсткістю 250Н/м. Амплітуда коливань 15см. Знайти повну механічну енергію коливань і найбільшу швидкість руху вантажу.

Відповідь: 2,8 Дж; 3,8 м/с.

Задача 24.127. За той самий час один математичний маятник здійснює 50 коливань, а другий 30. Знайти їхні довжини, якщо один з них на 32 см коротший від другого.

Відповідь: 18см; 50 см.

Задача 24.128. Як співвідносяться довжини математичних маятників, якщо за той самий час один з них робить 20, а другий – 60 коливань?

Відповідь: 9:1.

Задача 24.129. Скільки часу поширюється звук між залізничними станціями ($S = 33,2$ км) по повітряю? По рейках? Швидкість звуку в повітрі $v_n = 332$ м/с; сталі $v_c = 5,5$ км/с. Температура повітря 0^0 С.

Відповідь: $t_n = 100$ с; $t_c = 6$ с.

Задача 24.130. В однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,1$ Тл рівномірно обертається рамка розміром 20×30 см, яка має 100 витків дроту. Чому дорівнює амплітудне значення ε , якщо число обертів $n = 120$ об/хв?

Відповідь: $\varepsilon \approx 7,5$ В.

Задача 24.131. Визначити ємнісний електричний опір конденсатора ємністю $C = 40$ мкФ при частоті змінного струму 1 кГц і 50 Гц.

Відповідь: $X_c = 25$ Ом; 500 Ом.

Задача 24.132. Миттєве значення ЕРС змінюється за законом $U = 50 \cos 800\pi t$. Знайти частоту ν , період T та фазу.

Відповідь: $U_0 = 50$ В; $\nu = 400$ Гц;

$T = 2,5 \cdot 10^{-3}$ с; $\varphi = 800\pi t$.

Задача 24.133. Визначити індуктивний опір котушки, якщо її індуктивність $L = 2,0$ Гн, а частота струму $\nu = 50$ Гц.

Відповідь: $X_L = 628$ Ом.

Задача 24.134. Визначити індуктивний опір котушки, якщо її індуктивність $L = 2,0$ Гн, а частота струму $\nu = 50$ Гц.

Відповідь: $X_L = 628$ Ом.

Задача 24.135. Ефективна напруга в мережі $U = 120$ В. Чому дорівнює час, протягом якого горить неонові лампа в кожний напівперіод, якщо напруга запалювання $U_1 = 84$ В?

Відповідь: $t = T/3$.

Оптика, атомна та ядерна фізика

Задача 24.136. На якій відстані від увігнутого дзеркала з радіусом кривизни $R = 0,3$ м зберуться відбиті паралельні промені?

Відповідь: $d = 0,15$ м.

Задача 24.137. На якій відстані f від увігнутого дзеркала з $R = 30$ см вийде зображення предмета, якщо він перебуває на відстані $d = 20$ см від дзеркала?

Відповідь: $f = 0,6$ м.

Задача 24.138. Визначити кут падіння світлових променів на поверхню води з повітря, якщо кут заломлення $\gamma = 45^\circ$, а показник заломлення води $n = 1,33$. Чому дорівнює кут відбиття?

Відповідь: $\beta = 70^\circ$.

Задача 24.139. При переході світла з повітря у воду кут відбиття $\beta = 60^\circ$, а кут заломлення $\gamma = 40^\circ$. Визначите швидкість світла у воді.

Відповідь: $v = 230000$ км/с.

Задача 24.140. На скляну пластинку з показником заломлення $n = 1,5$ падає промінь світла. Який кут падіння променя α , якщо кут між відбитим і заломленим променями дорівнює 90° ?

Відповідь: $\alpha = 56^\circ 24'$.

Задача 24.141. Знайти граничний кут α_{np} повного відбиття для речовини з показником $n = 1,33$.

Відповідь: $\alpha_{np} = 48,5^\circ$.

Задача 24.142. Зображення предмета перебуває на відстані $f = 10,2$ см від збиральної лінзи, з фокусною відстанню $F = 10$ см. На якій відстані від лінзи розміщений предмет?

Відповідь: $d = 5$ м.

Задача 24.143. Оптична сила лінзи 5 дптр. Чому дорівнює фокусна відстань?

Відповідь: $F = 0,2$ м.

Задача 24.144. Зображення предмета на фотоплівці має розмір 2 см. Фокусна відстань об'єктива фотоапарата $F = 13,5$ см, відстань від плівки до оптичного центру об'єктива $l = 15$ см. Яка величина предмета?

Відповідь: 18 см.

Задача 24.145. Відстань від зображення до лінзи $f_1 = 0,3$ м, а від предмета до лінзи $d_1 = 0,4$ м. У скільки разів збільшиться зображення, якщо предмет розташувати на відстані $d_2 = 0,2$ м від лінзи?

Відповідь: у 8 разів.

Задача 24.146. Граничний кут повного внутрішнього відбиття на границі з повітрям для деякої речовини дорівнює 30° . Знайти показник заломлення цієї речовини.

Відповідь: $n = 2$.

Задача 24.147. На всю поверхню збиральної лінзи, що має діаметр d і фокусну відстань F , спрямований пучок променів, паралельних головній оптичній осі. На якій відстані L від лінзи треба поставити екран, щоб на ньому вийшло світле коло діаметром D ?

Відповідь: $L = \frac{(D \pm d) \cdot F}{D}$.

Задача 24.148. Лампочка перебуває на відстані 12,5 см від збиральної лінзи, оптична сила якої дорівнює 10 дптр. На якій відстані від лінзи вийде зображення і яким воно буде?

Відповідь: 50 см; збільшене в 4 рази.

Задача 24.149. На якій відстані від лінзи з фокусною відстанню 12 см треба поставити предмет, щоб його дійсне зображення було втричі більше від самого предмета?

Відповідь: 16 см.

Задача 24.150. Знайти роботу виходу A електронів з вольфраму і швидкість фотоелектронів для монохроматичного світла з довжиною хвилі $\lambda = 1,8 \cdot 10^{-5}$ см. Червона границю фотоефекту для вольфраму $\lambda = 2,75 \cdot 10^{-5}$ см.

Відповідь: $A = 7,2 \cdot 10^{-19}$ Дж; $\nu = 0,91 \cdot 10^6$ м/с.

Задача 24.151. Знайти червону границю фотоефекту для калію, якщо робота виходу $A = 3,2 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Відповідь: $\lambda_{\text{кр}} = 0,62$ мкм.

Задача 24.152. Чи буде спостерігатися фотоефект у вольфрамі, якщо опромінювати його поверхню зеленим світлом з довжиною хвилі $\lambda = 0,5$ мкм. Робота виходу електронів з поверхні вольфраму $A = 7,2 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Відповідь: так.

Задача 24.153. Ядро ізотопу ${}_{27}^{60}\text{Co}$ викинуло електрон. У яке ядро перетворилося ядро кобальту? Записати реакцію.

Відповідь: ${}_{27}^{60}\text{Ni}$.

Задача 24.154. Ядро ізотопу ${}_{15}^{30}\text{P}$ викинуло позитрон. У яке ядро перетворилося ядро фосфору? Записати реакцію.

Відповідь: ${}_{14}^{30}\text{Si}$.

Задача 24.155. За який час розпадеться 0,25 радіоактивного ізотопу, якщо період напіврозпаду 24 год?

Відповідь: 10,5 год.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРИ

1. Грабовский Р.И. Курс физики/ Р.И. Грабовский. – М.: Высш. шк., 1980. – 607 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие / Т.И. Трофимова.– М.: Высш. шк., 1990.– 478 с.
3. Рохманов М.Я. Фізика/ М.Я. Рохманов, С.С. Авотін. – Х.: ХНАУ, 2013. – Ч.1. – 88 с.
4. Гнап А.К. Механіка та молекулярна фізика: навч. посібник / А.К. Гнап, М.Я. Рохманов. – Х.: ХНАУ, 1999. – 226 с.
5. Гнап А.К. Електрика та магнетизм: навч. посібник / А.К. Гнап, М.Я. Рохманов. – Х.: ХНАУ, 1999. – 175 с.
6. Гнап А.К. Оптика та атомна фізика: навч. посібник / А.К. Гнап, М.Я. Рохманов. – Х.: ХНАУ, 1999. – 135 с.
7. Вайданич В.І. Фізика / В.І. Вайданич, Г.М. Пенцак.– Львів: ЛСУУ, 2005. – 663 с.
8. Фізика: підручник / І.Є. Лопатинський, І.Р. Зачек, Г.А. Ільчук, Б.М. Романішин. – Львів: Афіша, 2005. – 394 с.
10. Чолпан П.П. Основы физики/ П.П. Чолпан. – К.: Вищ. шк., 1995. – 488 с.
11. Рохманов М.Я. Фізика: зб. Тест. завдань: навч. посібник/ М.Я. Рохманов, В.В. Онищенко, Н.О. Онищенко. – Х.: ХНАУ, 2007. – 130 с.
12. Мэрион Дж. Б. Общая физика с биологическими примерами/ Дж. Б. Мэрион. – М.: Высш. шк., 1986. – 623 с.
13. Посудін Ю.І. Фізика і біофізика навколишнього середовища/ Ю.І. Посудін. – К.:Світ . – 303 с.
14. Гродзинский Д.М. Биофизика растений/ Д.М. Гродзинский. –К.: Наук. думка, 1973. – 256 с.
15. Волькенштейн М.В. Биофизика: учебник/ М.В. Волькенштейн. – М.: Наука, 1988.– 592 с.
16. Биофизика: учебник/ Ю.А. Владимиров, Д.И. Рощупкин, А.Я. Потапенко, А.И. Деев.– М.: Медицина, 1983.– 272 с.
17. Лекции по биофизике / под ред. П.О. Макарова. – Л.: Изд-во ЛенГУ, 1968. –272 с.
18. Рубин А.Б. Биофизика: учеб. для биол. спец. вузов в 2 кн. Кн.1. Теоретическая биофизика/ А.Б. Рубін. – М.: Высш. шк., 1987.– 319 с.

ДОДАТОК

Скалярний добуток векторів

$$(\vec{a} \cdot \vec{b}) = a \cdot b \cdot \cos \alpha;$$

$$(\vec{a} \cdot \vec{b}) = (\vec{b} \cdot \vec{a}).$$

Векторний добуток векторів

$$\vec{a} \times \vec{b} = a \cdot b \cdot \sin \alpha \cdot \vec{n};$$

$$\vec{a} \times \vec{b} = -\vec{b} \times \vec{a}.$$

Таблиця похідних та інтегралів

$$\frac{d}{dx} x^n = nx^{n-1};$$

$$\int x^n dx = \frac{1}{n+1} x^{n+1};$$

$$\frac{d}{dx} x^{-n} = -nx^{-n-1};$$

$$\frac{d}{dx} (\ln x) = \frac{1}{x};$$

$$\int \frac{dx}{x} = \lg x + c;$$

$$\frac{d}{dx} (\sin x) = \cos x;$$

$$\int \sin x = -\cos x + c;$$

$$\frac{d}{dx} (\cos x) = -\sin x;$$

$$\int \cos x = \sin x + c;$$

$$\frac{d}{dx} (e^x) = e^x;$$

$$\int e^x dx = e^x;$$

$$\frac{d}{dx} (e^{-x}) = -e^{-x};$$

$$e = 2,73.$$

Значення експоненти при α значно менших від одиниці ($\alpha \ll 1$)

$$e^\alpha \approx 1 + \alpha;$$

$$\sqrt{1 + \alpha} \approx 1 + \frac{1}{2} \alpha.$$

Деякі фізичні сталі

| Фізичні величини | Наближені значення для розв'язання задач |
|---|---|
| Абсолютний нуль температури | -273^0C |
| Атомна одиниця маси (а.о.м.) | $1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ |
| Гравітаційна стала | $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ кг}^{-1} \text{ м}^3 \text{ з}^2$ |
| Заряд електрона | $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ |
| Магнітна стала | $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ |
| Маса Землі | $6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$ |
| Маса електрона | $9 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ |
| Молярна газова стала | $8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$ |
| Молярна маса повітря | $29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ |
| Нормальний атмосферний тиск | 10^5 Па |
| Стала Авогадро | $6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ |
| Стала Планка | $6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж с}$ |
| Стала Фарадея | $9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$ |
| Швидкість звуку у повітрі при 0^0C | 332 м/с |
| Швидкість світла у вакуумі | $3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ |
| Середній радіус Землі | 6400 км |
| Середня відстань Землі від Сонця | $15 \cdot 10^{10} \text{ м}$ |
| Прискорення вільного падіння | $9,8 \text{ м/с}^2$ |
| Електрична стала | $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ |

Множники і префікси

| Множник | Префікс | Позначення префікса | Множник | Префікс | Позначення префікса |
|-----------|---------|---------------------|------------|---------|---------------------|
| 10^{18} | екса | Э | 10^{-1} | деци | д |
| 10^{15} | пета | П | 10^{-2} | санти | (с) |
| 10^{12} | тера | Т | 10^{-3} | мілі | (м) |
| 10^9 | гіга | Г | 10^{-6} | мікро | (мк) |
| 10^6 | мега | М | 10^{-9} | нано | (н) |
| 10^3 | кіло | к | 10^{-12} | піко | (п) |
| 10^2 | гекто | г | 10^{-15} | фемто | (ф) |
| 10^1 | дека | так | 10^{-18} | атто | (а) |

Таблиця 3

Густина твердих тіл, $\rho \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$

| Назва речовини | Числове значення | Назва речовини | Числове значення |
|-----------------|------------------|----------------|------------------|
| Алюміній | 2,7 | Нікель | 8,8 |
| Антрацит | 1,5 | Олово | 7,3 |
| Береза (суха) | 0,7 | Платина | 21,5 |
| Бетон | 2,2 | Пробка | 0,2 |
| Вольфрам | 19,0 | Свинець | 11,4 |
| Граніт | 2,6 | Срібло | 10,5 |
| Дуб (сухий) | 0,8 | Сосна | 0,9 |
| Залізо | 7,8 | Сталь | 7,9 |
| Золото | 19,3 | Скло | 2,5 |
| Кам'яне вугілля | 1,8 | Порцеляна | 2,3 |
| Цегла | 1,8 | Цемент | 1,4 |
| Латунь | 8,5 | Цинк | 7,1 |
| Лід | 0,9 | Чавун | 7,0 |
| Мідь | 8,9 | Ебоніт | 1,8 |

Таблиця 4

Коефіцієнт об'ємного розширення рідин β, K^{-1}

| Назва речовини | Числове значення | Назва речовини | Числове значення |
|----------------|------------------|----------------|------------------|
| Вода | 0,00018 | Ртуть | 0,00018 |
| Гліцерин | 0,0005 | Скипидар | 0,00067 |
| Гас | 0,001 | Спирт | 0,0011 |

Таблиця 5

Густина рідин, $\rho \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$

| Назва речовини | Числове значення | Назва речовини | Числове значення |
|-------------------------|------------------|--------------------------|------------------|
| Бензин | 0,7 | Нафта | 0,76 |
| Вода (4 ⁰ С) | 1,0 | Ртуть (0 ⁰ С) | 13,6 |
| Гліцерин | 1,26 | Сірчана кислота | 1,84 |
| Гас | 0,8 | Спирт | 0,8 |
| Масло | 0,92 | Ефір | 0,72 |

Таблиця 6

**Густина газів за нормальних умов, кг/м^3
($T = 273 \text{ K}$; $p_0 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$)**

| Назва речовини | Числове значення | Назва речовини | Числове значення |
|----------------|------------------|-----------------|------------------|
| Азот | 0,00125 | Гелій | 0,00018 |
| Аміак | 0,00077 | Кисень | 0,00143 |
| Водень | 0,00009 | Неон | 0,00090 |
| Повітря | 0,00129 | Вуглекислий газ | 0,00198 |

Таблиця 7

Коефіцієнт лінійного розширення твердих тіл α , K^{-1}

| Назва речовини | Числове значення | Назва речовини | Числове значення |
|----------------|------------------|----------------|------------------|
| Алюміній | 0,000024 | Свинець | 0,000029 |
| Залізо | 0,000012 | Срібло | 0,000019 |
| Латунь | 0,000019 | Сталь | 0,000011 |
| Кварц | 0,0000004 | Скло | 0,000009 |
| Мідь | 0,000017 | Цинк | 0,000029 |
| Олово | 0,000027 | Чавун | 0,000010 |

Таблиця 8

Питома теплоємність твердих тіл і рідин c , $\text{Дж/кг}\cdot\text{K}$

| Назва речовини | Числове значення | Назва речовини | Числове значення |
|----------------|-------------------|----------------|-------------------|
| Алюміній | $9,2 \cdot 10^2$ | Свинець | $1,2 \cdot 10^2$ |
| Залізо | $4,6 \cdot 10^2$ | Срібло | $2,5 \cdot 10^2$ |
| Цегла | $7,5 \cdot 10^2$ | Золото | $1,25 \cdot 10^2$ |
| Латунь | $3,8 \cdot 10^2$ | Цемент | $8 \cdot 10^2$ |
| Лід | $2,1 \cdot 10^3$ | Цинк | $4 \cdot 10^2$ |
| Мідь | $3,8 \cdot 10^2$ | Чавун | $5,5 \cdot 10^2$ |
| Парафін | $3,2 \cdot 10^3$ | Вода | $4,18 \cdot 10^3$ |
| Олово | $2,5 \cdot 10^2$ | Гас | $2,14 \cdot 10^3$ |
| Пісок | $9,7 \cdot 10^2$ | Ефір | $2,3 \cdot 10^3$ |
| Ртуть | $1,25 \cdot 10^2$ | | |

Таблиця 9

Питома теплота згоряння палива q , МДж /кг

| Назва речовини | Числове значення | Назва речовини | Числове значення |
|----------------|------------------|-----------------|------------------|
| Бензин | 46 | Спирт | 27 |
| Дерево | 15 | Торф | 15 |
| Гас | 43 | Вугілля буре | 9,3 |
| Нафта | 46 | Вугілля деревне | 30 |
| Порох | 30 | Вугілля кам'яне | 20-30 |

Таблиця 10

Температура плавлення $t_{пл}$ і питома теплота плавлення λ

| Назва речовини | t °С | λ , кДж/кг | Назва речовини | t °С | λ , кДж/кг |
|----------------|--------|--------------------|----------------|--------|--------------------|
| Алюміній | 658 | 380 | Ртуть | -39 | 12,5 |
| Залізо | 1520 | 270 | Свинець | 327 | 2,5 |
| Лід | 0 | 335 | Цинк | 419 | 118 |
| Мідь | 1084 | 180 | Чавун білий | 1200 | 130 |
| Олово | 232 | 58 | Чавун сірий | 1150 | 97 |

Таблиця 16

Питомий опір речовин (Ом·м)

| Назва речовини | Числове значення | Назва речовини | Числове значення |
|----------------|---------------------|----------------|---------------------|
| Алюміній | $2,8 \cdot 10^{-8}$ | Нікелін | $4,0 \cdot 10^{-7}$ |
| Залізо | $1,1 \cdot 10^{-7}$ | Ніхром | $1,0 \cdot 10^{-6}$ |
| Константан | $5,0 \cdot 10^{-7}$ | Графіт | $3,9 \cdot 10^{-6}$ |
| Мідь | $1,7 \cdot 10^{-8}$ | | |

Таблиця 17

Відносна діелектрична проникливість речовин

| Назва речовини | Числове значення | Назва речовини | Числове значення |
|----------------|------------------|----------------|------------------|
| Парафін | 2 | Слюда | 7 |
| Скло | 6 | Вода | 81 |
| Фарфор | 5 | Керосин | 2 |
| Ебоніт | 3 | Повітря | 1,0006 |

Таблиця 18

Маса нейтральних атомів деяких ізотопів (а.о.м.)

| Назва частинки | Числове значення | Назва частинки | Числове значення |
|--------------------|------------------|--------------------------|------------------|
| Водень 1_1H | 1,00783 | Вуглець ${}^{12}_6C$ | 12,00000 |
| Водень 2_1H | 2,01410 | Вуглець ${}^{14}_6C$ | 14,00324 |
| Водень 3_1H | 3,01605 | Азот ${}^{13}_7N$ | 13,00574 |
| Гелій 3_2He | 3,01603 | Азот ${}^{14}_7N$ | 14,00307 |
| Гелій 4_2He | 4,00260 | Кисень ${}^{16}_8O$ | 15,99491 |
| Літій 6_3Li | 6,01513 | Сірка ${}^{32}_{14}S$ | 32,02793 |
| Літій 7_3Li | 7,01601 | Фосфор ${}^{32}_{15}P$ | 32,02609 |
| Берилій 9_4Be | 9,01219 | Нікель ${}^{60}_{28}Ni$ | 60,06921 |
| Бор ${}^{10}_5B$ | 10,01294 | Золото ${}^{197}_{79}Au$ | 197,03346 |
| Бор ${}^{11}_5B$ | 11,00930 | Уран ${}^{235}_{92}U$ | 235,04392 |

Таблиця 19

Маса та енергія спокою деяких частинок (а.о.м.)

| Назва частинки | Маса спокою, а.о.м. | Енергія спокою, Дж | Енергія спокою, MeV |
|---|---------------------|-----------------------|---------------------|
| Електрон | 0,00055 | $8,16 \cdot 10^{-14}$ | 0,511 |
| Протон | 1,00728 | $1,50 \cdot 10^{-10}$ | 938 |
| Нейтрон | 1,00867 | $1,51 \cdot 10^{-10}$ | 939 |
| Дейтон | 2,01355 | $3,00 \cdot 10^{-10}$ | 1876 |
| α - частинка | 4,00149 | $5,96 \cdot 10^{-10}$ | 3733 |
| $1 \text{ а.о.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 931,494 \text{ MeV}$ | | | |