Волинський національний університет імені Лесі Українки
Навчально-науковий фізико-технологічний інститут

**Кафедра експериментальної фізики,
інформаційних та освітніх технологій**

Андрій Кевшин, Володимир Галян

ФІЗИКА З ОСНОВАМИ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Конспект лекцій

Луцьк
2022

УДК 539.2
К-33

Рекомендовано до друку науково-методичною радою Волинського національного університету імені Лесі Українки (протокол № від 2022 р.).

Рецензенти: ***Луньов С. В.*** – канд. фіз.-мат. наук, доцент, кафедри фізики та вищої математики Луцького НТУ;

Трохимчук П. П. – канд. фіз.-мат. наук, доцент, кафедри теоретичної та математичної фізики імені А. В. Свідзинського, ВНУ імені Лесі Українки.

К 33 Кевшин А. Г., Галян В.В. **Фізика з основами радіоелектроніки**: конспект лекцій. Луцьк : Вежа-Друк, 2022. 113 с.

Конспект лекцій з «Фізика з основами радіоелектроніки» – складова комплексу робочих матеріалів написаних на українській мові, створених для забезпечення якісної практичної підготовки фахівців галузі знань 19 Архітектура та будівництво.

Дане навчальне видання містить лекції, у яких у доступній формі викладені фізичні основи механіки, молекулярної фізики і термодинаміки, електромагнетизму, оптики, атомної та ядерної фізики, базові поняття радіоелектроніки.

Навчально-методичне видання відповідає чинним навчальним програм підготовки й рекомендовано студентам спеціальності 193 – Геодезія та землеустрій.

УДК 539.2
© Кевшин А. Г., Галян В.В., 2022
© Вежа-Друк, 2022

ЗМІСТ

ВСТУП 5

ЛЕКЦІЯ 1. ПРЕДМЕТ ФІЗИКИ І ЇЇ ЗВ'ЯЗОК З ІНШИМИ ПРИРОДНИЧИМИ НАУКАМИ 6

1.1. Предмет фізики і її зв'язок з іншими природничими науками. 6
1.2. Фізичні методи досліджень. 6
1.3. Роль модельних уявлень у фізиці. 7
1.4. Фізичні величини та їх вимірювання. Система одиниць фізичних величин. 8

ЛЕКЦІЯ 2. МЕХАНІКА. КІНЕМАТИКА 10

2.1. Механічний рух. Види руху та його характеристики. 10
2.2. Рівномірний прямолінійний рух тіл. Рівняння рівномірного руху. 11
2.3. Прямолінійний рівноприскорений рух. Прискорення. 12
2.4. Криволінійний рух матеріальної точки. 13
2.5. Інерціальні системи відліку. Перший закон Ньютона. 15
2.6. Поняття сили. Другий закон Ньютона. 15
2.7. Третій закон Ньютона. 16
2.8. Види взаємодій і сили в механіці. 17

ЛЕКЦІЯ 3. ЗАКОНИ ЗБЕРЕЖЕННЯ В МЕХАНІЦІ 20

3.1. Імпульс. Повний імпульс системи матеріальних точок. Закон збереження імпульсу. 20
3.2. Механічна робота. Потужність. 21
3.3. Кінетична енергія. Теорема про кінетичну енергію. 22
3.4. Консервативні сили. Потенціальна енергія. 22
3.5. Закон збереження та перетворення механічної енергії. 23
3.6. Коливальний рух. Величини, що характеризують коливальний рух. 24

ЛЕКЦІЯ 4. ОСНОВИ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ. ЗАКОНИ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ 30

4.1. Основні поняття молекулярно-кінетичної теорії. Броунівський рух. Маса молекул. Кількість речовини. 30
4.2. Ідеальний газ. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії. 31

ЛЕКЦІЯ 5. РІВНЯННЯ СТАНУ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ. ГАЗОВІ ЗАКОНИ ІЗОПРОЦЕСИ. БАРОМЕТРИЧНА ФОРМУЛА 34

5.1. Рівняння Менделєєва-Клайперона. 34
5.2. Газові закони. Ізопроцеси. 35
5.3. Барометрична формула. 36

ЛЕКЦІЯ 6. ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ 38

6.1. Внутрішня енергія і робота в термодинаміці. 38
6.2. Способи зміни внутрішньої енергії. Робота в термодинаміці. 39
6.3. Перший закон термодинаміки. Необоротність теплових процесів. 40
6.4. Принцип роботи теплового двигуна. 42
6.5. Властивості рідин. Поверхневий натяг. 44
6.6. Змочування. Капілярні явища. 45

ЛЕКЦІЯ 7. ОСНОВИ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ. ЕЛЕКТРОСТАТИКА 47

7.1. Електричний заряд. Закон Кулона. 47
7.2. Електричне поле. Напруженість електричного поля. 48
7.3. Потенціал електростатичного поля. Різниця потенціалів. Робота з переміщення заряду в електростатичному полі. 50
7.4. Електроємність. Конденсатори. Енергія зарядженого конденсатора. 51
7.5. Електричний струм. Характеристики струму. 53
7.6. Закон Ома для ділянки кола. Опір. 54

ЛЕКЦІЯ 8. РОБОТА І ПОТУЖНІСТЬ СТРУМУ. ЗАКОН ДЖОУЛЯ-ЛЕНЦА. 57

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЯВИЩА
8.1. Робота і потужність струму. Закон Джоуля-Ленца. 57
8.2. Характеристики магнітного поля. 57
8.3. Графічне зображення магнітних полів. 59
8.4. Виявлення магнітного поля за його дією на електричний струм. Правило лівої руки. Сила Лоренца. 60
ЛЕКЦІЯ 9. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ 62
9.1. Явище електромагнітної індукції. Правило Ленца. 62
9.2. Самоіндукція. Індуктивність контуру. Енергія магнітного поля. 64
9.3. Магнітне поле Землі. 64
ЛЕКЦІЯ 10. ХВИЛЬОВА ТА ГЕОМЕТРИЧНА ОПТИКА 66
10.1. Історія розвитку уявлень про природу світла. 66
10.2. Геометрична оптика. Закони геометричної оптики. 66
10.3. Лінзи. Побудова зображень, що дає тонка лінза. 68
ЛЕКЦІЯ 11. ОСНОВИ ФОТОМЕТРІЇ. ФОТОМЕТРИЧНІ ВЕЛИЧИНИ. ХВИЛЬОВА ОПТИКА 71
11.1. Основні поняття фотометрії. 71
11.2. Інтерференція світла. Когерентність. 72
ЛЕКЦІЯ 12. ДИФРАКЦІЯ СВІТЛА. ВЗАЄМОДІЯ СВІТЛОВИХ ХВИЛЬ З РЕЧОВИНОЮ 76
12.1. Дифракція світла. 76
12.2. Дисперсія світлових хвиль. 77
12.3. Взаємодія світлових хвиль з речовиною. 78
ЛЕКЦІЯ 13. КВАНТОВА ФІЗИКА. РАДІОАКТИВНІСТЬ. МОДЕЛІ БУДОВИ АТОМА 80
13.1. Квантова гіпотеза Планка. 80
13.2. Зовнішній фотоелектричний ефект. Закони фотоефекту. 80
13.3. Радіоактивність як свідчення складної будови атомів. 81
13.4. Моделі атомів. Дослід Резерфорда. 82
ЛЕКЦІЯ 14. БУДОВА АТОМА І АТОМНОГО ЯДРА. ЕНЕРГІЯ ЗВ'ЯЗКУ. ДЕФЕКТ МАС 85
14.1. Склад атомного ядра. Масове число. Зарядове число. Ядерні сили. 85
14.2. Енергія зв'язку. Дефект мас. 86
14.3. Ядерні перетворення. Ядерні реакції. Виділення і поглинання енергії при ядерних реакціях. 87
14.4. Закон радіоактивного розпаду. Правила зміщення при радіоактивному розпаді. 88
ЛЕКЦІЯ 15. ПРЕДМЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ. ОСНОВИ ПЕРЕДАЧІ І ПРИЙОМУ ІНФОРМАЦІЇ 90
15.1. Предмет та основні поняття радіоелектроніки. 90
15.2. Основні принципи передачі і прийому інформації. 90
ЛЕКЦІЯ 16. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ 95
16.1. Напівпровідникові матеріали. 95
16.2. Електронно-дірковий перехід (*p-n* перехід). 96
ЛЕКЦІЯ 17. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ 100
17.1. Загальні відомості про діоди. 100
17.2. Характеристики різних типів діодів. 101
ЛЕКЦІЯ 18. ЛЕКЦІЯ 18. ТРАНЗИСТОРИ 106
18.1. Будова та принцип дії біполярних транзисторів. 106
18.2. Принцип дії біполярних транзисторів**.** 107
ЛІТЕРАТУРА 110

ВСТУП

Курс «Фізика з основами радіоелектроніки» знайомить з фундаментальними поняттями, законами і теоріями класичної та сучасної фізики, містить послідовне викладення фізичних принципів функціонування радіоелектронних кіл і пристроїв. Викладені базові питання радіоелектроніки, починаючи від класифікації електричних сигналів до особливостей поширення радіохвиль. Засвоєння суті і змісту фізичних законів, розуміння природи фізичних закономірностей, забезпечить можливість свідомо ставити і розв'язувати як теоретичні, так і прикладні задачі майбутньої спеціальності.

Метою викладання навчальної дисципліни "Фізика" є формування у студентів міцних знань фундаментальних фізичних законів з механіки, молекулярної фізики, електрики, оптики, атомної і ядерної фізики, вивчення фізичних явищ та процесів, що мають місце в електротехнічних пристроях та лежать в основі роботи напівпровідникових пристроїв.

Основними *завданнями* є:

- вивчення студентами основних теоретичних відомостей та набуття практичних навичок розв'язання конкретних задач з фізики, формування вміння використовувати основні закони фізики для пояснення природних процесів, що відбуваються в літо-, гідро- та атмосфері Землі;

- формування знань, вмінь та навичок, необхідних для раціонального використання сучасних методів вимірювання при розв'язуванні задач пов'язаних з отриманням та опрацьовуванням інформації у сучасному виробництві, науці, повсякденній практиці;

- освоєння науки про вимірювання;

- знайомство студентів із перспективами у цій галузі знань;

- подальше становлення і вдосконалення професійної культури майбутніх фахівців.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні:

знати:

основні закономірності механіки, молекулярної фізики і термодинаміки, електрики і магнетизму, оптики, основи атомної і ядерної фізики; найважливіші напрямки застосування досягнень фізики, зокрема в геодезії;

зміст основних фізичних законів, понять та явищ, які розкривають фізичну картину світу;

види сигналів; елементну базу; види схем; основні елементи, вузли і пристрої радіоелектронних кіл та електронних систем автоматики та обчислювальної техніки;

принципи роботи і принципові схеми типових радіоелектронних пристроїв.

вміти:

– давати означення основним поняттям і фізичним явищам;

– складати рівняння простих фізичних рухів і процесів;

– застосовувати набуті знання для розв'язання задач з різних розділів фізики та радіоелектроніки;

– аналізувати принципи функціонування, призначення та умовні позначення напівпровідникових приладів; класифікацію, призначення та принципи функціонування радіоелектронних пристроїв (підсилювачів, генераторів), а також цифрових, побудованих на базі напівпровідникових приладів.

ЛЕКЦІЯ 1. ПРЕДМЕТ ФІЗИКИ І ЇЇ ЗВ'ЯЗОК З ІНШИМИ ПРИРОДНИЧИМИ НАУКАМИ

1.1. Предмет фізики і її зв'язок з іншими природничими науками.

Фізика (з грецької перекладається як «природа») – наука, що вивчає найбільш загальні властивості матерії і форми її руху. Під матерією розуміють весь навколишній світ, що включає два відомих нам види матерії – *речовина* (в твердому, рідкому, газоподібному стані і плазмі) і *поле* (гравітаційне, електромагнітне, поле ядерних сил), які здатні видозмінюватися і перетворюватися одне в одного і описуються законами фізики.

Невід'ємною загальною властивістю матерії є рух, який розуміється не тільки як механічне переміщення тіл у просторі, але і як зміна і розвиток як такі. Відомі такі види фізичних форм руху: механічні, атомно-молекулярні, гравітаційні, електромагнітні, внутріатомні і внутрішньоядерні процеси. Вони є загальними тому, що містяться у всіх більш складних формах руху матерії, які вивчаються іншими науками. Наприклад, процеси життєдіяльності організмів, що вивчаються біологією, завжди супроводжуються механічними, електричними, внутріатомними та іншими фізичними процесами. Таким чином, *предмет досліджень фізики* складають загальні закономірності явищ природи.

Фізика – одна з основних загальних природничих наук, в яких вивчаються закони неживої природи. Зв'язок фізики з іншими природничими науками виражається насамперед у тому, що, виявляючи загальні закономірності явищ природи, її макро- і мікросвіту, фізика фундаментальна по відношенню до них. Фізика дозволяє створювати прилади і виробляти методи дослідження, необхідні для розвитку інших наук. Наприклад, в розвитку біології велике значення мали мікроскоп, в астрономії – телескоп, в хімії – спектральний аналіз та ін.

Всі природничі науки широко застосовують метод мічених атомів, електронну апаратуру та інші фізичні прилади, а також різні методи фізичних досліджень. Справедливий, звичайно, і зворотний зв'язок: розвиток інших природничих наук ставить перед фізикою нові завдання і сприяє її прогресу і удосконаленню.

Фізика як наука про природу має спільні об'єкти і методи дослідження з іншими природничими науками. На межі між фізикою і хімією виникли такі науки, як фізична хімія і хімічна фізика, між фізикою і біологією – біофізика. Широке застосування фізичних методів у геології й астрономії привело до виділення як окремих наук геофізики й астрофізики. Фізичні закони мають відношення до процесів, які відбуваються в природі в зв'язку з виробничою діяльністю людини. І для ліквідації негативних впливів такої діяльності, для охорони природи потрібно використати знання законів фізики.

Фізика як наука, розвивалася в конкретних історичних суспільних умовах, які відображені в гуманітарних науках. Вивчення фізики з посиланням на історичні обставини покращує сприймання навчального матеріалу. Так, конкретніше звучить матеріал, зв'язаний з дослідженнями Дж. Бруно, Г. Галілея, І. Ньютона і т.д., якщо одночасно згадуються тодішні суспільнополітичні умови, хронологія, зв'язок з іншими подіями. Позитивні результати дає також використання фізичних задач з історичним змістом, історичних картин, фотографій і т.п.

Фактично важко знайти хоча б один навчальний предмет, який би не впливав на процес навчання фізики. Використання такого впливу, врахування взаємного зв'язку і активне включення його в роботу, дозволяє суттєво покращити навчальний процес з фізики.

1.2. Фізичні методи досліджень.

Вивчення фізики здійснюється трьома методами дослідження: *спостереження, науковий експеримент, моделювання.*

Історично спостереження – найдавніший спосіб дослідження фізики. Вважається, що першою людиною, яка проявила себе у спостереженні, був Арістотель. До середніх віків вчені всього світу в основному вивчали фізичні явища за допомогою спостережень.

У середні віки починає розвиватися другий спосіб дослідження фізики – експеримент. Експеримент ставиться із заздалегідь запланованим результатом, ходом роботи, і вже на основі експерименту за певною схемою визначаються і відслідковуються певні закономірності.

Найновіший спосіб вивчення фізики пов'язаний з *моделюванням*. Фізичне моделювання здійснюється шляхом відтворення процесу, що досліджується на моделі, яка може мати в загальному випадку відмінну від оригіналу природу, але однаковий математичний опис. При цьому фізичні процеси, що протікають у моделі і оригіналі, є подібними.

Для пояснення експериментальних даних використовуються гіпотези. Гіпотеза – це наукове припущення, яке висувається для пояснення якого-небудь факту або явища і потребує перевірки та доведення для того, щоб стати науковою теорією або законом. Вірність гіпотези перевіряється постановкою відповідних дослідів. Успішно пройшовши таку перевірку і доведення , гіпотеза перетворюється в наукову теорію або закон. Найзагальніші фізичні теорії дозволяють формулювання фізичних законів, які вважаються загальними істинами, доки накопичення нових експериментальних результатів не вимагатиме їхнього уточнення.

1.3. Роль модельних уявлень у фізиці.

Моделювання – один з основних методів пізнання, який полягає в побудові моделей реально існуючих об'єктів, заміні реального об'єкта його підходящою моделлю і подальшого дослідження побудованої моделі. Під моделлю об'єкта чи явища у фізиці ми будемо розуміти якийсь інший об'єкт, реалізований у рамках тієї чи іншої знакової системи. Цей об'єкт:

– співставляється з реально існуючим природним об'єктом;

– подібний до вихідного об'єкта, тобто адекватно відображає властивості вихідного об'єкта;

– будується з певною метою, заздалегідь обумовленою суб'єктом моделювання;

– відображає лише деякі властивості вихідного об'єкта, визнані суб'єктом моделювання істотними;

– створюється для отримання інформації про вихідний об'єкті, необхідної для вирішення певної задачі.

Для одного фізичного явища може бути кілька моделей або навіть кілька сімейств моделей. У такому випадку ці моделі повинні взаємно однозначно відповідати (ізоморфізм моделей) або частково односторонньо відповідати одна модель інший (гомоморфізм). У науці роль моделей важлива, так як без моделі немає теорії.

Найпростішою моделлю тіл, рух яких вивчає класична механіка, є матеріальна точка. Тіло, розмірами якого в умовах даної задачі можна знехтувати, *називається матеріальною точкою*. Матеріальних точок в природі не існує. Матеріальна точка є абстракція, ідеалізований образ реально існуючих тіл. Можна чи не можна те чи інше тіло при вивченні будь-якого руху прийняти за матеріальну точку – це залежить не стільки від

самого тіла, скільки від характеру руху, а також від змісту питань, на які ми хочемо отримати відповідь. Абсолютні розміри тіла при цьому не грають ролі. Важливі відносні розміри, тобто відношення розмірів тіла до деяких відстаней, характерним для даного руху. Якщо ми розглянемо потяг, який підходить до станції, то необхідно відзначити: потяг порівняно зі станцією не може вважатися матеріальною точкою. Адже розміри потягу дуже великі, станції теж великі. Вони порівнянні, а якщо розміри порівнянні, то ні в якому разі говорити про матеріальну точу не можна. А от якщо розглянути рух потягу, наприклад, з Києва до Сімферополя, то в порівнянні з усією відстанню, яку проходить цей потяг, його можна вважати його матеріальною точкою. Крім того, порівнювати можна не тільки лінійні розміри тіл, але й інші фізичні величини (наприклад, тиск, швидкість, період і т.д.).

Будь-яке тіло, розмірами якого знехтувати не можна, можна вважати як сукупність матеріальних точок.

Під впливом тіл один на одного тіла можуть деформуватися, тобто змінювати свою форму та розміри. Тому в механіці вводиться ще одна модель – *абсолютно тверде тіло*. *Абсолютно твердим тілом* називається тіло, яке ні за яких умов не може деформуватися і за всіх умов відстань між точками (або точніше між двома частинками) цього тіла залишається постійною.

Поняття матеріальної точки, абсолютно твердого тіла, ідеальної рідини і ідеального газу та ін. – абстрактні, але їх введення дозволяє наочно і простіше досліджувати властивості відповідних тіл і полегшує розв’язок практичних задач.

1.4. Фізичні величини та їх вимірювання. Система одиниць фізичних величин.

Фізика належить до класу точних наук, де кількісне визначення фізичних величин грає важливу роль. У фізичних дослідженнях визначаються зміни різних фізичних величин, таких, наприклад, як швидкість, довжина, сила і т.д. *Фізичні величини* – це властивості тіла або характеристики процесу, зміни яких можна визначити кількісно за допомогою вимірювань, тобто шляхом порівняння даної величини з певною величиною того ж роду, прийнятої за одиницю. Отже, виміряти фізичну величину – це означає порівняти її з іншою такою ж фізичною величиною, прийнятої за одиницю. Наприклад, довжину предмета порівнюють з одиницею довжини, масу тіла порівнюють з одиницею маси. Але якщо один дослідник виміряє довжину, наприклад, пройденого шляху сажнями, а інший дослідник виміряє її в футах, то їм, напевно, відразу буде важко зрозуміти один одного.

Тому в усьому світі намагаються вимірювати фізичні величини в одних і тих же одиницях. З 1 січня 1963 р. було введено Міжнародну систему одиниць – СІ (система інтернаціональна). Система СІ містить 7 основних одиниць та 2 допоміжні одиниці. Основними фізичними величинами СІ є *довжина, маса, час, термодинамічна температура Кельвіна, сила електричного струму, сила світла* і *кількість речовини*. Допоміжними є радіан та стерадіан. Радіан – (1 рад) плоский кут, утворений двома радіусами, довжина дуги між якими дорівнює радіусу: 1 рад=$57^0$17’44,8”. Стерадіан – (1 ср) тілесний кут з вершиною в центрі сфери, який вирізає на поверхні сфери площу, що дорівнює квадрату радіуса сфери.

Система фізичних величин – сукупність взаємопов’язаних фізичних величин, в якій декілька величин приймають за незалежні, а інші визначають як залежні від них. Побудова системи фізичних величин передбачає вибір основних і похідних фізичних величин.

Основна фізична величина – фізична величина, яка входить у систему фізичних величин і приймається за незалежну.

Похідна фізична величина – фізична величина, яка входить у систему фізичних величин і визначається через основні величини цієї системи. Наприклад, у СІ одиниця сили ньютон (Н) похідна і визначається з другого закону Ньютона:

$$1\ \text{Н} = 1\ \text{кг}\cdot 1\ \text{м/с}^2.$$

Розмірності обох частин фізичних величин повинні бути однаковими. Це положення дозволяє перевіряти правильність будь–яких фізичних формул, зокрема формул, одержуваних при розв'язку задач.

Перевіримо, наприклад, формулу шляху прямолінійного рівноприскореного руху:

$$S = \vartheta_0 t + \frac{at^2}{2}$$

де ϑ_0 – початкова швидкість, а – прискорення:

$$[S] = м;\ [\vartheta_0 t] = \frac{м}{c}\cdot c = м;\ \left[\frac{at^2}{2}\right] = \frac{м}{c^2}\cdot c^2 = м$$

У межах СІ до системи одиниць додано десяткові кратні і частинні одиниці, що їх утворено за допомогою спеціально рекомендованих множників, а їхні назви і позначення – з назв і позначень вихідних одиниць за допомогою відповідних префіксів. Кратна одиниця у ціле число разів більша за одиницю, від якої вона утворюється, а частинна одиниця у ціле число разів менша за одиницю, від якої вона утворюється. Множники, префікси та їх позначення подано в таблиці 1.

Таблиця 1. Множники, префікси та їхні позначення для деяких кратних і частинних одиниць СІ

Множник	**Префікс**	**Позначення**	
		українське	**міжнародне**
10^{12}	тера	*Т*	*T*
10^{9}	гіга	*Г*	*G*
10^{6}	мега	*М*	*M*
10^{3}	кіло	*к*	*k*
10^{2}	гекто	*г*	*h*
10	дека	*да*	*da*
10^{-1}	деці	*д*	*d*
10^{-2}	санти	*с*	*c*
10^{-3}	мілі	*м*	*m*
10^{-6}	мікро	*мк*	*μ*
10^{-9}	нано	*н*	*n*
10^{-12}	піко	*п*	*P*

Вирази: $1{,}2\cdot 10^4$ м можна записати 12 км; 0,00394 м можна записати 3,94 мм; 1401 Па можна записати 1,401 кПа.

Контрольні запитання до лекції №1.

1. Що таке фізика?
2. Що розуміють під матерією?
3. Що є предметом дослідження фізики?
4. Які ви знаєте методи дослідження фізики?
5. В чому полягає суть моделювання при вивченні фізики?
6. Що розуміють під матеріальною точкою, абсолютно твердим тілом?
7. Що таке фізичні величини?
8. Які ви знаєте основні та допоміжні фізичні величини?
9. Що розуміють під системою фізичних величин?
10. Що розуміють під основною та похідною фізичною величиною?

ЛЕКЦІЯ 2. МЕХАНІКА. КІНЕМАТИКА

2.1. Механічний рух. Види руху та його характеристики.

Механіка – розділ фізики, який вивчає закономірності механічного руху тіл та причини його виникнення і змін. Класична механіка (механіка Ньютона) включає в себе такі розділи: *кінематика, динаміка, статика*.

Головне поняття механіки – це механічний рух. *Механічний рух* – це зміна положення тіла відносно інших тіл з часом. Щоб описати рух будь-якого тіла, потрібно вказати інше тіло відносно якого розглядається рух даного тіла, вказати систему координат та визначити, яким чином ми будемо слідкувати за часом. Про все це говорять як про систему відліку. *Системою відліку* називають тіло відліку, систему координат, що пов'язана з тілом відліку, та прилад для виміру часу. Просторово-часовий опис рухів за допомогою відстаней і інтервалів часу можливий тільки тоді, коли вибрана певна система відліку.

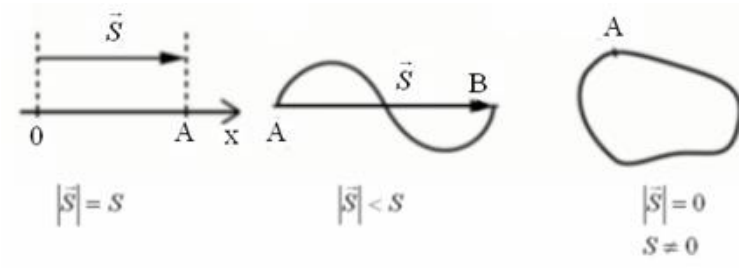
Вивчення механіки почнемо з кінематики. *Кінематикою називають* розділ механіки, який присвячено опису руху тіл, без з'ясування причин такого руху. Кінематика в перекладі з грецької мови означає рух. А рух у нас може бути трьох видів – це *поступальний*, *обертальний* і *коливальний* рух.

Поступальним називається такий рух, при якому всі точки тіла рухаються в одному напрямку і проходять однакову відстань за один і той же час (наприклад пряма вздовж планки висувної шухляди, залишається паралельною своєму положенню у будь-який момент часу, рух кабіни ліфта).

Обертальним називається такий рух, при якому всі точки тіла рухаються в площинах, перпендикулярних до нерухомої прямої, що називається віссю обертання тіла, і описують кола, центри яких лежать на цій осі (обертання коліс, маховиків, лопастей літальних апаратів, Землі навколо своєї осі та ін.).

Коливальним називається такий рух, який з плином часу повністю або частково повторюється (коливаються мости, коли по ним походять потяги, частини працюючих механізмів, голосові зв'язки, коли ми розмовляємо, високовольтні дроти під дією вітру, струни на музикальних інструментах).

Однією із характеристик найвідомішою характеристикою руху є пройдений шлях, який позначається латинською літерою S і вимірюється в метрах. *Пройдений шлях* – це довжина траєкторії, а *траєкторія* – це лінія, вздовж якої рухається тіло. Необхідно відзначити той факт, що коли ми говоримо про рух тіла, то обов'язково повинні враховувати те, що розглядаємо тіло, як матеріальну точку, тобто тіло, розмірами якого можна знехтувати в умовах даної задачі. Іноді говорять так, що розмірами тіла можна знехтувати в порівнянні з іншими тілами, щодо яких ми розглядаємо цей рух.



а б в

Рис. 2.1.1

Крім пройденого шляху, існує ще одна характеристика руху – це *переміщення*, яке позначається літерою $\vec{S}$ і є векторною величиною. *Переміщення* – це вектор, який з'єднує початкову точку руху тіла з його кінцевою.

Переміщення і пройдений шлях – різні фізичні величини. Інколи вони можуть співпадати (рис. 2.1.1 а), проте в загальному випадку шлях більший за переміщення (рис. 2.1.1 б). Пройдений шлях говорить про те, скільки тіло пройшло, тобто пройдений шлях ніколи не може дорівнювати нулю. А ось переміщення, оскільки це вектор, може дорівнювати нулю (рис. 2.1.1 в).

Ще однією характеристикою руху є швидкість. *Швидкість* – це фізична величина, яка характеризує швидкість руху. Позначається швидкість латинською літерою $\vec{\vartheta}$, є величиною векторною, тобто характеризується не тільки своїм значенням, а й своїм напрямком. У загальному випадку говорять, що *швидкість* – це фізична величина, яка визначається відношенням переміщення тіла до часу, протягом якого це переміщення відбулося:

$$\vec{\vartheta} = \frac{\vec{S}}{t} \qquad (2.1.1)$$

Формула (2.1.1) є загальною формулою для обчислення швидкості. Для розв'язку задач дуже важливою є формула для обчислення середньої швидкості, яка записується наступним чином:

$$\vartheta = \frac{S_1 + S_2 + ... + S_N}{t_1 + t_2 + ... + t_N} \qquad (2.1.2)$$

Середня швидкість є не векторною величиною. Вона характеризує просто швидкість руху по траєкторії. Тому можна сказати, що середня швидкість – це відношення повного пройденого шляху до повного часу руху. У формулі (2.1.2) t_1, t_2, …, t_N – час за який тіло проходить відповідно шляхи S_1, S_2, …, S_N.

Крім зазначених характеристик механічного руху – шлях, переміщення, швидкість, необхідно відзначити ще й систему відліку та пам'ятати, що в різних системах відліку швидкість тіла буде різною, що свідчить про відносність механічного руху. Наприклад, водій автомобіля рухається відносно дороги, а відносно салону автомобіля знаходиться у спокої.

2.2. Рівномірний прямолінійний рух тіл. Рівняння рівномірного руху.

Рівномірним прямолінійним називається рух матеріальної точки вздовж прямої, якщо за рівні проміжки часу тіло проходить однакові шляхи. Тобто це рух з постійною швидкістю, але координата тіла змінюється з плином часу.

Вектор швидкості точки залишається незмінним, а її переміщення визначається добутком швидкості на час:

$$\vec{S} = \vec{\vartheta}t \qquad (2.2.1)$$

Під час розв'язання задач векторні фізичні величини, що характеризують рух тіла, записують у проекціях на відповідну вісь, тобто:

$$S_x = \vartheta_x t \qquad (2.2.2)$$

Проекцією точки на пряму (вісь) називають основу перпендикуляра, опущеного з цієї точки на пряму. Проекція вектора на вісь – це відрізок осі між проекцією початку і кінця вектора на цю ж вісь. Вона може бути додатною, якщо напрями вектора і вибраної осі збігаються, від'ємною, якщо ці напрями не збігаються, дорівнювати нулю, якщо вектор перпендикулярний до осі.

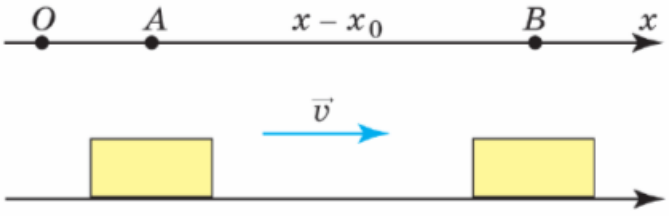


Рис. 2.2.1

Припустимо, що тіло рухається вздовж певної прямої (рис. 2.2.1). Направимо вздовж цієї прямої одну з координатних осей, наприклад вісь *Ox*. Якщо за певний час *t* тіло перемістилося з точки *A*, координата якої дорівнює x_0, у точку *B* з координатою *x*, то можна сказати, що тіло здійснило додатне переміщення, довжина якого дорівнює:

$$S_x = x - x_0 \qquad (2.2.3).$$

Проекція швидкості на вісь *Ox* у даному випадку також є додатним числом

$$\vartheta_x = \vartheta \qquad (2.2.4).$$

Підставляючи (2.2.3) та (2.2.4) у формулу (2.2.2), одержимо:

$$x = x_0 + \upsilon t \qquad (2.2.5)$$

Рівняння (2.2.5) визначає залежність координати тіла від часу і називається рівняння руху. Як бачимо з даного рівняння з часом координата тіла буде збільшуватись від x_0 до деякого значення x. x_0 називають початковою координатою**.** *Початкова координата* – це координата тіла в момент часу t=0. Іншими словами це координата тіла в той момент часу коли ми почали розглядати його рух.

Якщо напрям руху буде протилежним до обраного напряму осі координат, то з часом координата тіла буде зменшуватись, і тоді рівняння руху (2.2.5) запишеться у вигляді:

$$x = x_0 - \upsilon t \qquad (2.2.6)$$

Знак „мінус" перед швидкістю вказує на те, що тіло рухається проти осі координат.

Для рівномірного прямолінійного руху залежність швидкості тіла та його координати від часу можна зобразити графічно. На рис. 2.2.2 показані різні випадки такої залежності.

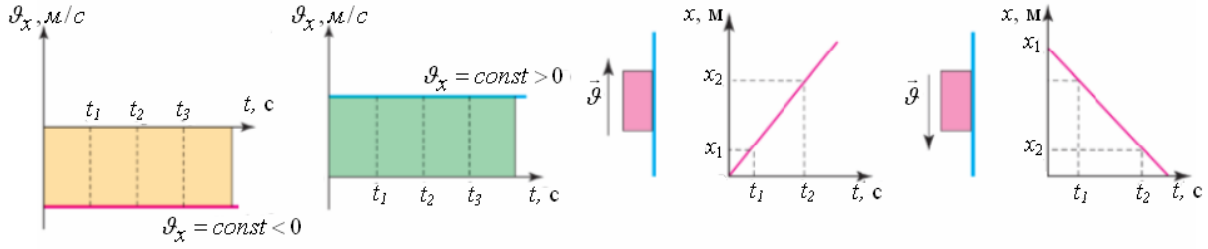


Рис. 2.2.2

2.3. Прямолінійний рівноприскорений рух. Прискорення.

Рух, при якому тіло за рівні проміжки часу проходить неоднакові відрізки шляху, *називається нерівномірним*.

Рух матеріальної точки, під час якого її швидкість за будь-які однакові проміжки часу збільшується або зменшується на ту саму величину, називається *рівнозмінним*. Якщо швидкість за будь-які однакові проміжки часу збільшується на ту саму величину, то такий рух називається *рівноприскореним*, якщо зменшується – *рівносповільненим*.

Нерівномірний рух характеризують зміною швидкості від точки до точки. Ця зміна швидкості характеризується величиною, яка називається прискоренням. Позначається прискорення $\vec{a}$ і є векторною величиною.

Прискорення – це фізична величина, яка характеризує зміну швидкості і визначається як відношення зміни швидкості до часу, протягом якого ця зміна відбулася.

$$\vec{a} = \frac{\vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0}{t} \qquad (2.3.1)$$

де $\vec{\vartheta}_0$ – початкова швидкість; $\vec{\vartheta}$ – кінцева швидкість руху тіла.

У цілому рівнозмінним називають такий рух тіла, за якого прискорення є сталим ($\vec{a} = const$).

Для характеристики нерівномірного руху вводиться нова фізична величина – миттєва швидкість. *Миттєва швидкість* – це швидкість тіла в даний момент або в даній точці траєкторії. З формули (2.3.1) можна знайти $\vec{\vartheta}$:

$$\vec{\vartheta} = \vec{\vartheta}_0 + \vec{a}t \qquad (2.3.2)$$

Формула (2.3.2) матиме різний вигляд запису, в залежності від напрямку вибраної осі, напрямків початкової швидкості та прискорення. На рис. 2.3.1 показані дані випадки.

Рівняння руху тіла з постійним прискоренням вперше вивів італійський фізик Галілео Галілей. В загальному вигляді воно має вигляд:

$$x = x_0 + \vec{\vartheta}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2} \qquad (2.3.3)$$

Це рівняння дає змогу визначити координату тіла в довільний момент часу при рівнозмінному русі. Рівняння проекції переміщення на вісь Ox при рівноприскореному русі має вигляд:

$$S_x = \vartheta_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2} \qquad (2.3.4)$$

Співвідношення між переміщенням і швидкостями записується так:

$$S_x = \frac{\vartheta_x^2 - \vartheta_{0x}^2}{2a_x};\ S_x = \frac{\vartheta_{0x} + \vartheta_x}{2} t \qquad (2.3.5)$$

Графічно залежності даних фізичних величин для рівнозмінного руху для різних випадків показано на рис. 2.3.1.

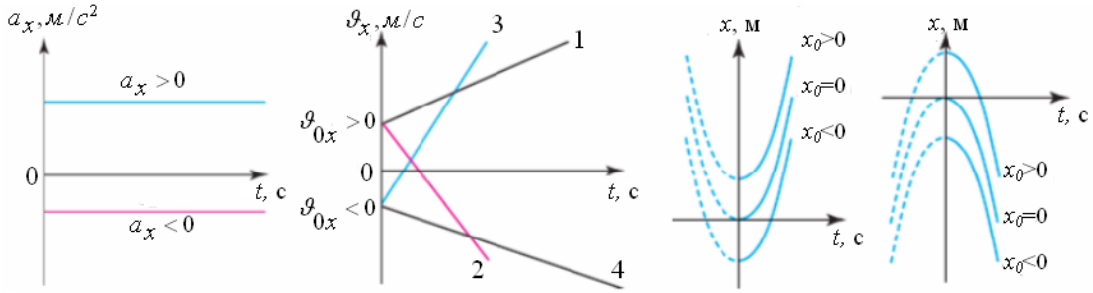
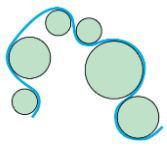


Рис. 2.3.1.

2.4. Криволінійний рух матеріальної точки.

Криволінійним називають рух, траєкторія якого є крива лінія. Такі рухи відбуваються під дією сил напрямлених під кутом до швидкості. Будь-який криволінійний рух тіл можна звести до руху по дугах – частинах кіл різних радіусів. Тобто криволінійний рух є комбінацією послідовних рухів тіла по колу та ділянок, на яких тіло рухається прямолінійно.



Розглянемо найпростіший криволінійний рух тіла – рух по колу з незмінною за модулем швидкістю. *Рівномірним рухом* тіла по колу називають такий рух, при якому швидкість тіла змінюється за напрямом, але не змінюється за значенням. Прикладами рівномірного руху по колу можна наближено вважати рух штучних супутників Землі.

Швидкість руху тіла по колу (лінійну швидкість) за аналогією з рівномірним прямолінійним рухом можна знайти за формулою

$$\vartheta = \frac{l}{t}. \qquad (2.4.1)$$

де l – довжина дуги кола, яку проходить тіло. Нехай тіло здійснить один оберт по колу, тоді формула (2.4.1) набуде вигляду

$$\vartheta = \frac{2\pi R}{T} \qquad (2.4.2)$$

де R – радіус кола, T – період обертання.

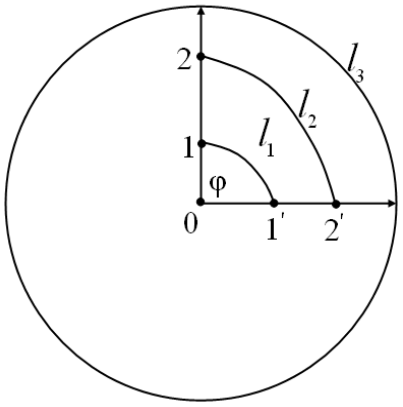


Рис. 2.4.1.

Розглянемо обертальний рух на прикладі диска, що обертається зображеного на рис. 2.4.1. Як видно з рисунка кожна з точок цього диска має свою лінійну швидкість, бо за один і той же час вони проходять відповідно відрізки дуг $l_1<l_2<l_3$. Однаковою для цих точок буде кутова швидкість обертання. *Кутова швидкість* ω точки, що рівномірно рухається по колу, визначається за формулою:

$$\omega = \frac{\varphi}{t}, \qquad (2.4.3)$$

де φ – кут, на який повернулося тіло за час t. Цей кут називається кутовим переміщенням матеріальної точки.

Для тіл, що здійснюють багато обертів, які виконуються з періодичною залежністю (штучні супутники, деталі обертових механізмів тощо) вводять величини, які називають періодом обертання і частотою обертання. *Період обертання* – це час, протягом якого тіло робить один повний оберт по колу. Якщо тіло робить N обертів, то період має вигляд

$$T = \frac{t}{N} \qquad (2.4.4)$$

При рівномірному русі точки по колу за час t, що дорівнює періоду обертання тіла (t=T) радіус-вектор точки повернеться на кут 2π радіан (вектор, початок якого збігається з початком координат, а кінець визначає положення деякої матеріальної точки, називається радіус-вектором цієї точки). Один радіан відповідає центральному куту, довжина дуги якого точно дорівнює радіусу кола. Тоді формулу (2.4.3) можна записати так:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \qquad (2.4.5)$$

Величину, обернену до періоду обертання, називають частотою обертання і вимірюють кількістю обертів за одиницю часу ([n] = 1/с=Гц (герц)):

$$\nu = \frac{1}{T} \qquad (2.4.6)$$

З формул (2.4.2) і (2.4.5) маємо:

$$\vartheta = \omega R \qquad (2.4.7)$$

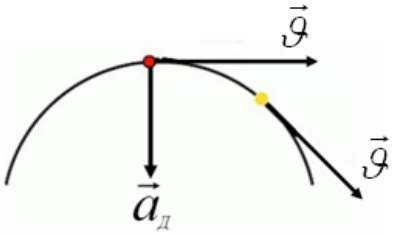


Рис. 2.4.2.

При криволінійному русі швидкість тіла напрямлена по дотичній до траєкторії (рис. 2.4.2). Навіть якщо швидкість по модулю залишається величиною постійною, зміна швидкості приводить до появи прискорення. Рівномірний рух тіла по колу – це рух з прискоренням, яке в усіх точках кола напрямлене до центра (рис. 2.4.2), хоча за модулем швидкість руху тіла не змінюється. Його так і називають *доцентровим прискоренням*. У будь-якій точці доцентрове прискорення перпендикулярне до лінійної швидкості і визначається за формулою:

$$a_д = \frac{\vartheta^2}{R}. \qquad (2.4.8)$$

Враховуючи формулу (2.4.7), формулу (2.4.8) можна переписати так:

$$a_д = \omega^2 R \qquad (2.4.9)$$

2.5. Інерціальні системи відліку. Перший закон Ньютона.

Динаміка в перекладі з грецького означає «сила». Саме слово динаміка вперше було використано давньогрецьким ученим Аристотелем в 4 столітті до нашої ери. *Динамікою* називають розділ механіки, в якому вивчають механічний рух тіл під дією прикладених до них сил (під дією інших тіл). В основі динаміки лежать 3 закони Ньютона. Вони є емпіричними, дослідними законами.

Великий внесок у вивченні динаміки зробили Леонардо да Вінчі і Галілео Галілей, зокрема, саме Галілей ввів поняття «інерція».

Слово «*інерція*» – латинське слово, в перекладі на українську мову означає «бездіяльний», «без руху». Це слово характеризує явище, при якому тіло зберігає свій стан, коли на тіло не діють інші тіла. Якщо тіло рухалося, то воно буде продовжувати рухатися, якщо тіло було в стані спокою, то воно буде знаходитися в стані спокою. Часто в повсякденному житті ми вживаємо слово «інертність». Інертність характеризує властивість тіл, яке полягає в тому, що тіло буде зберігати свій стан. Властивість інертності характеризується такою величиною, як маса. Чим більша маса тіла, тим його важче зсунути з місця або, навпаки, зупинити. У часи Галілея часто використовували закон, який звучить так: «*тіло буде зберігати свою швидкість, якщо на нього не діють інші тіла*». Цей закон отримав назву закону інерції. Саме ці поняття мають безпосереднє відношення до поняття «інерціальна система відліку».

Розглянемо рух тіла (або стан спокою) у випадку, якщо на тіло не діють інші тіла. Висновок про те, як буде вести себе тіло у відсутності дії інших тіл, вперше був висловлений Рене Декартом: якщо тіло рухається і на нього не діють інші тіла, то рух буде зберігатися, він залишатиметься прямолінійним і рівномірним. Якщо ж на тіло не діють інші тіла, а тіло нерухоме, то зберігатиметься стан спокою. Але стан спокою пов'язаний з системою відліку (СВ). В одній СВ тіло нерухоме, а в іншій – рухається. Отже не у всіх системах відліку тіло буде рухатися прямолінійно і рівномірно або перебувати в стані спокою при відсутності дії на нього інших тіл. Тому для вирішення головного завдання механіки важливо вибрати таку систему відліку, де виконується закон інерції, де зрозуміла причина, що викликала зміну руху тіла. Якщо тіло буде рухатися прямолінійно і рівномірно у відсутності дії інших тіл, така система відліку називається *інерціальною системою відліку* (ІСВ).

Вперше сформулював закон, присвячений ІСВ, Ісаак Ньютон. Заслуга Ньютона полягає в тому, що він перший науково показав, що швидкість рухомого тіла змінюється не миттєво, а в результаті якоїсь дії протягом часу. Ось цей факт і ліг в основу створення закону, який називається першим законом Ньютона.

Перший закон Ньютона: *існують такі системи відліку, в яких тіло рухається прямолінійно і рівномірно або перебуває у стані спокою в тому випадку, якщо на тіло не діють сили або всі сили, що діють на тіло, скомпенсовані.* Такі системи відліку називаються інерціальними.

По-іншому іноді говорять наступне: інерціальною системою відліку називається така система, в якій виконуються закони Ньютона.

2.6. Поняття сили. Другий закон Ньютона.

З'ясуємо, до чого призводить дія на тіло інших тіл, тобто взаємодія. Взаємодія – це дія тіл один на одного. Вона не може бути односторонньою, не може бути спрямованою тільки на одне тіло, вона обов'язково повинна розглядатися як дія тіл одне на одного, тобто для цього обов'язково потрібні як мінімум два тіла. Мірою такої взаємодії є поняття сили. Вперше це поняття було вжито в II столітті до н.е. Аристотелем. У перекладі з грецької «сила» – це динамо, звідси й походить динаміка – розділ механіки, в якому розглядається рух тіл і взаємодія тіл.

Сила – величина векторна, тобто вона повністю визначена, якщо зазначено її чисельне значення, напрям та точку прикладання сили. Пряму, проведену через точку прикладання сили в напрямку її дії, *називають лінією дії сили*. Результат дії сили на абсолютно тверде тіло не зміниться при перенесенні точки прикладання сили уздовж лінії дії сили. Позначається сила літерою $\vec{F}$, вимірюється в ньютонах (Н). Для вимірювання сили потрібен прилад – динамометр. Зазвичай кажуть, що взаємодія призводить до того, що протягом деякого часу змінюється або швидкість тіла, або деформується тіло, тобто змінюється його форма і об'єм. А може відбуватися і те й інше.

Отже дія тіл характеризується величиною, яку ми називаємо силою. Якщо сила діє, значить, відповідно, з'являється прискорення. Якщо є прискорення, значить, можна говорити про те, що на тіло діють інші тіла або діють деякі сили. Другий закон Ньютона базується на результатах дуже багатьох фізичних експериментів і говорить про те, що тіло буде рухатися з прискоренням, якщо на нього діє сила. Це прискорення прямо пропорційно прикладеною силі і обернено пропорційно масі цього тіла.

Другий закон Ньютона: *прискорення, що надане діючою на матеріальну точку (тіло) силою, прямо пропорційне цій силі, збігається з нею за напрямком й обернено пропорційне масі цього тіла:*

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

Якщо на матеріальну точку одночасно діють кілька сил, то кожна з них надає матеріальній точці прискорення, незалежно від інших сил, тобто

$$\vec{a} = \sum_{i=1}^{N} \frac{\vec{F}_i}{m} = \sum_{i=1}^{N} \vec{a}_i$$

Це положення називають *принципом незалежності дії сил*, або *принципом суперпозиції рухів*. Якщо на матеріальну точку одночасно діє кілька сил, то в другому законі Ньютона під силою ми розуміємо рівнодіючу всіх сил:

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^{N} \vec{F}_i$$

2.7. Третій закон Ньютона.

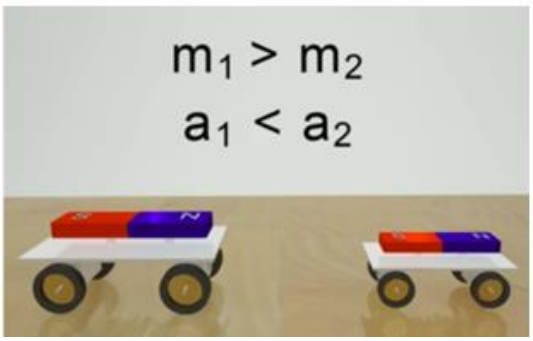


Рис. 2.7.1

Всяка дія тіл, одне на інше, носить характер взаємодії. Розглянемо взаємодію двох тіл, зображених на рис. 2.7.1. Візьмемо два легкі візки і на яких закріпимо два магніти напрямлених різними полюсами один до одного. Ці візки будуть рухатися назустріч один одному, причому більш масивний візок m_1 рухатиметься з меншим прискоренням a_1, ніж візок m_2, що матиме прискорення a_2, тобто виконуватимуться співвідношення: $m_1>m_2$; $a_2>a_1$. Результати експериментальних досліджень показують, що при цьому виконується наступне співвідношення:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}$$

Кількісно ця взаємодія визначається 3-м законом Ньютона**,** що говорить*, якщо тіло 1 діє на тіло 2 з деякою силою F_{21}, то й тіло 2, у свою чергу, буде діяти на тіло 1 з такою ж по величині й протилежно спрямованою силою F_{12}.*

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

Застосовуючи третій закон Ньютона, завжди потрібно пам'ятати, що однакові за модулем та протилежні за напрямком сили діють на різні тіла, і тому не можуть урівноважувати одна одну. Закони Ньютона виконуються тільки в інерціальних системах відліку, вони перестають бути правильними для об'єктів дуже малих розмірів, які порівнянні з розмірами атомів, та коли рух відбувається зі швидкостями наближеними до швидкості світла.

2.8. Види взаємодій і сили в механіці.

Навколо нас відбувається безліч взаємодій різних матеріальних об'єктів. Ці взаємодії мають кількісні і якісні відмінності.

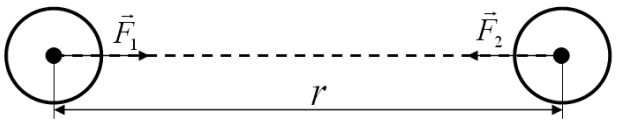
У механіці вивчають *гравітаційні сили (сили тяжіння)* і два види електромагнітних сил – *сили пружності* та *сили тертя*. За своєю природою ці сили є результатом гравітаційної і електромагнітної взаємодій.

Гравітаційна взаємодія – це взаємодія між будь-якими матеріальними об'єктами у світі. Гравітаційні взаємодії відіграють істотну роль для тіл з великими масами. Наприклад, взаємодія планет, Землі та Місяці, тіла та Землі.

Електромагнітні сили діють між частинками, які мають електричний заряд. Ці сили відіграють основну роль при взаємодії атомів, молекул та окремих частин речовини. Електромагнітні сили залежать від відстані між зарядженими частинками.

Усі тіла в природі взаємно притягуються. Це явище називається *гравітацією*. Сили, з якими тіла притягуються одне до одного, *називаються гравітаційними*, або силами всесвітнього тяжіння. Гравітаційна взаємодія між тілами відбувається через гравітаційне поле. *Гравітаційне поле* – це особливий вид матерії, його створює навколо себе кожне тіло. Чим більше маса тіла, тим сильніше його гравітаційне поле.

Силу гравітаційної взаємодії двох тіл можна визначити за законом всесвітнього тяжіння, який відкрив Ісаак Ньютон у 1767 р. Закон всесвітнього тяжіння визначає взаємодію між двома точковими тілами масами m_1 та m_2, які розміщені на відстані r один від одного і формулюється так: *сила притягання між двома точковими тілами пропорційна добутку мас цих точок m_1 і m_2, обернено пропорційна квадрату відстані r між ними і направлена вздовж прямої, що з'єднує ці точкові тіла*:



$$F_{12} = G\frac{m_1 m_2}{r^2} \qquad (2.8.1)$$

G=6,672 10^{-11} м^3/(кг·с^2) – універсальна гравітаційна стала.

У законі всесвітнього тяжіння маса виступає мірою тяжіння тіл і називається гравітаційною масою. Таким чином, ми вже знаємо два визначення маси, з одного боку, це міра інертності тіла (інертна маса), а з іншого боку, маса – міра притягання тіл (гравітаційна маса).

Ми всі живемо на тілі з величезною масою – на планеті Земля. Людина, та будь-який інший предмет масою m притягаються до Землі внаслідок закону всесвітнього тяжіння. Цю силу притягання до Землі *називають силою тяжіння* й розраховують за формулою

$$F = mg \qquad (2.8.2)$$

Врахувавши формулу (2.8.1), ми можемо записати;

$$mg = G\frac{mM}{R^2}$$

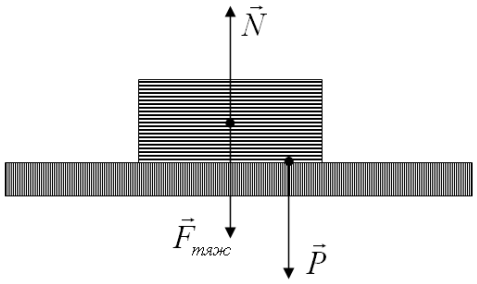
де g – прискорення вільного падіння, M – маса Землі, $R=R_з+h$ – відстань від центра Землі до тіла маси m. З останнього рівняння маємо:

$$g = G\frac{M}{R^2} = G\frac{M}{(R_з + h)^2}$$

Тобто, у загальному випадку прискорення вільного падіння залежить від висоти тіла над поверхнею Землі. Так як в більшості практично важливих випадків виконується умова $h<<R_з$ ($R_З$=6400 км), то у останній формулі можна зневажити h, і формула для g буде мати вигляд

$$g = G\frac{M}{R_з^2}$$

Всі величини у формулі (3.4.5) константи. Отже, прискорення вільного падіння не залежить від маси падаючого тіла, тобто для всіх тіл воно однакове. Після нескладних обчислень одержимо g=9,81 м/с^2. Сила тяжіння направлена до центру Землі і за своєю природою відноситься до гравітаційних сил.



Вагою тіла називають силу $\vec{P}$, з якою тіло, внаслідок притягання до Землі, діє на опору або підвіс. Вага тіла є різновидом сил пружності. Вагу тіла $\vec{P}$ потрібно відрізняти від сили тяжіння $\vec{F}_{тяж}$. Це різні сили за своєю природою, вони прикладені до різних тіл. Сила тяжіння $\vec{F}_{тяж}$ діє на тіло, а вага тіла $\vec{P}$ діє на опору або підвіс.

Силою реакції опори називають силу $\vec{N}$, з якою опора або підвіс діють на тіло. Слід зазначити що, сила реакції опори $\vec{N}$ та вага тіла $\vec{P}$ однакові за модулем, але протилежні за напрямком відповідно до третього закону Ньютона

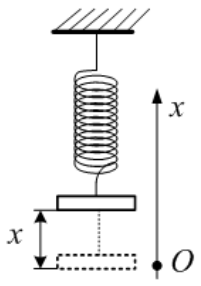
$$\vec{N} = -\vec{P}$$

Сила реакції опори завжди направлена по нормалі до поверхні, на якій знаходиться тіло.

Сили тертя виникають при переміщені тіл (або їхніх частин), які дотикаються одне до одного. Модуль сили сухого тертя ковзання, яка діє на тіло, що знаходиться на плоскій гладкій поверхні, прямо пропорційний до величини сили реакції опори:

$$\vec{F}_{тер} = \mu\vec{N}$$

Коефіцієнт пропорційності μ називається коефіцієнтом тертя, який приймає значення $0<\mu<1$. Тертя між поверхнями двох тіл при відсутності прошарку газу або рідини між ними, називається сухим тертям. Сухе тертя ще ділять на тертя ковзання й тертя кочення. Сила тертя завжди спрямована протилежно вектору швидкості.



*Сила пружності***.** Під дією зовнішніх сил виникають *деформації* (тобто зміни розмірів і форми) тіл. Якщо після припинення дії зовнішніх сил відновлюються попередні форма й розміри тіла, то таку деформацію називають *пружною*. Деформація має пружний характер у випадку, коли зовнішня сила не перевищує певного значення, яке називається *межею пружності*. При перевищенні цієї межі деформація стає *пластичною*. У цьому випадку після усунення зовнішніх сил початкова форма й розміри тіла повністю не відновлюються.

Розглянемо пружину, верхній кінець якої закріплений, а до нижнього приєднано вантаж. Якщо вантаж змістити на невелику відстань x, то у пружині виникне пружна сила

$$F_{пр} = -k\,x$$

де k – коефіцієнт пружності пружини. Знак мінус у правій частині формули вказує на те, що проекція пружної сили на вертикальну вісь і координата x мають різні знаки. Формула (3.4.8) є записом закону Гука**:** *при пружній деформації видовження пружини пропорційно зовнішній силі*. Жорсткість k пружини залежить від природи матеріалу.

Контрольні запитання до лекції №2.

1. Що таке механіка? З яких розділів вона складається?
2. Дайте означення понять «механічний рух» та «система відліку».
3. Які види руху ви знаєте?
4. Дайте означення понять «траєкторія», «пройдений шлях»переміщення.
5. Що таке швидкість. Запишіть формулу для її визначення
6. Що називається рівномірним прямолінійним рухом?
7. Дайте означення понять «рівноприскорений» та «рівносповільнений» рух.
8. Що таке прискорення? Запишіть формулу для його визначення.
9. Який рух називається криволінійним?
10. Запишіть формулу яка пов’язує лінійну швидкість з кутовою.
11. Розкрийте суть слова «інерція».
12. Які системи відліку називаються інерціальними?
13. Сформулюйте перший закон Ньютона.
14. Що таке сила?
15. Сформулюйте другий закон Ньютона.
16. Сформулюйте третій закон Ньютона.
17. Назвіть основні види взаємодій в механіці.
18. Сформулюйте і математично запишіть закон всесвітнього тяжіння.
19. Що називають вагоютіла.
20. Що називають силою реакції опори.

ЛЕКЦІЯ 3. ЗАКОНИ ЗБЕРЕЖЕННЯ В МЕХАНІЦІ

3.1. Імпульс. Повний імпульс системи матеріальних точок. Закон збереження імпульсу.

Імпульсом (кількістю руху) матеріальної точки (тіла) називається вектор, що дорівнює добутку маси матеріальної точки (тіла) на її швидкість

$$\vec{p} = m\vec{\vartheta} \tag{3.1.1}$$

Імпульс – векторна величина, спрямований він завжди в ту сторону, в яку спрямована швидкість. Саме слово «імпульс» латинське і перекладається на українську мову як «штовхати», «рухати». Імпульс позначається маленькою літерою $\vec{p}$, а одиницею виміру імпульсу є $\left[\frac{кг \cdot м}{с}\right]$.

Першою людиною, яка використовувала поняття імпульс, був Рене Декарт. Імпульс він спробував використовувати як величину, яка замінює силу. Причина такого підходу очевидна: вимірювати силу досить складно, а вимірювання маси і швидкості – річ досить проста. Саме тому часто говорять, що імпульс – це кількість руху. А раз вимір імпульсу є альтернативою вимірювання сили, значить, потрібно пов'язати ці дві величини. Для цього знайдемо похідну за часом виразу (3.1.1). У класичній механіці *m=const*, і тоді похідна за часом від (3.1.1) буде дорівнювати

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d}{dt}\left(m\vec{\vartheta}\right) = m\frac{d\vec{\vartheta}}{dt} = m\vec{a} = \vec{F}$$

або

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F} \tag{3.1.2}$$

Швидкість зміни імпульсу матеріальної точки дорівнює діючій на неї силі. Вираз (3.1.2) являє собою іншу форму запису другого закону Ньютона. Перепишемо це рівняння у вигляді

$$d\left(m\vec{\vartheta}\right) = \vec{F}dt \tag{3.1.3}$$

Фізична величина рівна $\vec{F}dt$ називається імпульсом сили за час її дії *dt*. Таким чином, *зміна імпульсу матеріальної точки за час dt дорівнює імпульсу результуючої сили, що діє на матеріальну точку за той же проміжок часу.*

Сукупність тіл, виділених для розгляду, називається *механічною системою*. Розглянемо систему матеріальних точок, на які не діють зовнішні сили. Така система називається замкнутою. *Внутрішніми називають сили*, з якими тіла системи діють один на одного. Позначимо внутрішні сили через $\vec{F}_{ik}$, де перший індекс вказує номер частинки, на яку діє сила, другий індекс – номер частинки, впливом якої обумовлена ця сила. Згідно з третім законом Ньютона $\vec{F}_{ik} = -\vec{F}_{ki}$, тобто $\vec{F}_{ik} + \vec{F}_{ki} = 0$. Звідси випливає, що геометрична сума всіх внутрішніх сил, що діють в системі, дорівнює нулю.

Розглянемо рух механічної системи, що складається з двох матеріальних точок. Позначимо внутрішні сили: через $\vec{F}_{12}$ – силу, що діє на першу точку з боку другої, $\vec{F}_{21}$ – силу, що діє на другу точку зі сторони першої. Рух кожної точки описується другим законом Ньютона:

$$\frac{d\vec{p}_1}{dt} = \vec{F}_{12};\ \frac{d\vec{p}_2}{dt} = \vec{F}_{21} \tag{3.1.4}$$

де $\vec{p}_1$ і $\vec{p}_2$ – імпульси точок з масами m_1 і m_2. Додавши ці два рівняння, одержимо:

$$\frac{d}{dt}\left(\vec{p}_1 + \vec{p}_2\right) = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{21} \tag{3.1.5}$$

Згідно з третім законом Ньютона, внутрішні сили попарно рівні і протилежні, тобто $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$. Тому у формулі (3.1.5) сума внутрішніх сил дорівнює 0.

Рівняння (3.1.5) можна узагальнити для механічної системи, яка складається з N частинок. Тому в загальному рівняння (3.1.5) можна записати так:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = 0 \qquad (3.1.6)$$

Це значить, що

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^{N} \vec{p}_i = \sum_{i=1}^{N} m_i \vec{\vartheta}_i = const \qquad (3.1.7)$$

Рівняння (3.1.7) називається законом збереження імпульсу: *повний імпульс всіх тіл замкнутої системи зберігається з часом.*

Рівняння (3.1.7) можна записати ще так:

$$m_1\vec{\vartheta}_1 + m_2\vec{\vartheta}_2 + ... + m_N\vec{\vartheta}_N = m_1\vec{u}_1 + m_2\vec{u}_2 + ... + m_N\vec{u}_N \qquad (3.1.8)$$

$\vec{\vartheta}_1$, $\vec{\vartheta}_2$, …, $\vec{\vartheta}_N$ – швидкість відповідних тіл до взаємодії, $\vec{u}_1$, $\vec{u}_2$, …, $\vec{u}_N$ – швидкості цих тіл після взаємодії.

Варто відзначити, що закон збереження імпульсу універсальний, тобто виконується завжди**.**

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

Не пружною взаємодією (не пружним ударом) називається взаємодія, після якої форма тіл не відновлюється і обидва тіла рухаються як одне.

3.2. Механічна робота. Потужність.

Нехай тіло під дією сили $\vec{F}$ рухається по деякій траєкторії із точки 1 у точку 2. У загальному випадку сила $\vec{F}$ може змінюватися як по величині, так і по напрямку. Розглянемо елементарне переміщення $d\vec{r}$, у межах якого силу $\vec{F}$ можна вважати постійною. Елементарною роботою dA сили $\vec{F}$ по переміщенню $d\vec{r}$ називають величину, рівну скалярному добутку $\vec{F}$ на $d\vec{r}$:

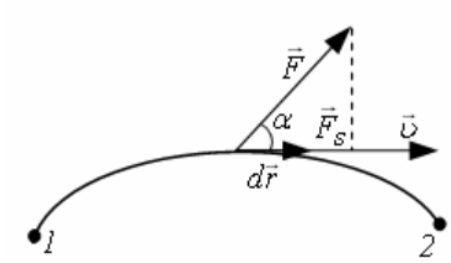


Рис. 3.2.1

$$dA = \left(\vec{F}d\vec{r}\right) \qquad (3.2.1)$$

або

$$dA = Fdr\cos\alpha = F_S ds \qquad (3.2.2)$$

де $ds = |d\vec{r}|$ – елементарний шлях, що проходить тіло, α – кут між векторами $\vec{F}$ і $d\vec{r}$, F_S – проекція вектора $\vec{F}$ на напрямок вектора $d\vec{r}$ (рис. 3.2.1). Якщо в процесі переміщення на відстань S сила не змінюється ні за модулем, ні за напрямом ($\vec{F}$ =const, 3.2.2), то робота A визначається рівнянням:

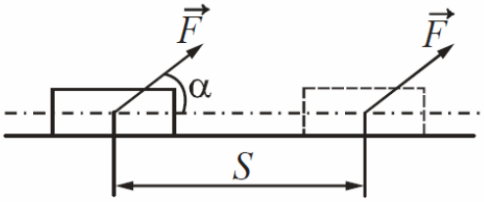


Рис. 3.2.2

$$A = FS\cos\alpha \qquad (3.2.3)$$

де α – кут між напрямком дії сили і переміщенням.

Якщо кут $0^0 \le \alpha < 90^0$, то робота додатна, якщо $90^0 < \alpha \le 180^0$, то робота від'ємна. При $\alpha = 90^0$ робота тотожно дорівнює нулю.

Якщо на тіло діє декілька сил, то робота над цим тілом рівна сумі робіт, тобто роботі сумарної сили. Робота вимірюється в джоулях $[A] = Дж = Н \cdot м$.

Величина, що характеризує швидкість виконання роботи силою $\vec{F}$, і рівна роботі, виконаній за одиницю часу, називається *потужністю*:

$$N = \frac{dA}{dt} = \frac{\vec{F}d\vec{r}}{dt} = \vec{F}\vec{\vartheta} \qquad (3.2.4)$$

Величина потужності в системі СІ вимірюється у Ваттах (Вт): $[Вт] = \frac{Дж}{с}$. Є ще позасистемні одиниці вимірювання потужності, наприклад, кінська сила: 1к.с.=736 Вт.

3.3. Кінетична енергія. Теорема про кінетичну енергію.

Розглянемо роботу, яку здійснює деяка сила F, що діє на тіло масою m. Під дією цієї сили дане тіло одержує прискорення a:

$$F = ma \qquad (3.3.1)$$

З формул кінематики випливає, що при русі з постійним прискоренням a, переміщення на відстань S відбувається із зміною швидкості від ϑ_1 до ϑ_2 і ці величини пов'язані формулою:

$$S = \frac{\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2}{2a} \qquad (3.3.2)$$

Тоді вираз для роботи, яка виконується під дією постійної сили F є добуток цієї сили на переміщення вздовж напрямку цієї сили:

$$A = FS = ma \cdot \frac{\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2}{2a} = \frac{m\vartheta_2^2}{2} - \frac{m\vartheta_1^2}{2} \qquad (3.3.3)$$

Величина

$$E_к = \frac{m\vartheta^2}{2} \qquad (3.3.4)$$

називається кінетичною енергією тіла, що має масу m і швидкість ϑ. Враховуючи (3.3.4), рівняння (3.3.3) можна записати так:

$$A = E_{к2} - E_{к1} \qquad (3.3.5)$$

Відзначимо, що в різних інерціальних системах відліку швидкість тіла може бути різною. Отже, кінетична енергія залежить від вибору інерціальної системи відліку. Тут же варто відзначити, що *кінетична енергія системи є функцією стану її руху*.

З формули (3.3.5) бачимо, що збільшення кінетичної енергії тіла на деякому переміщенні дорівнює алгебраїчній сумі робіт всіх сил, під дією яких відбувалося це переміщення. Формулу (4.3.5) *називають теоремою про кінетичну енергію.*

3.4. Консервативні сили. Потенціальна енергія.

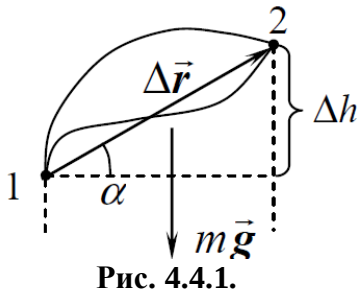


Рис. 4.4.1.

У сучасному природознавстві прийнято вважати, що взаємодія тіл здійснюється за допомогою полів. Полем сил називають область простору, у кожній точці якої на частинку діє сила, що закономірно змінюється від точки до точки. Інакше кажучи, якщо в кожній точці простору на матеріальну точку діють сили, то говорять, що в просторі визначене силове поле. Приклад силового поля – поле сили тяжіння. Нехай тіло переміщається із точки 1 у точку 2 (рис. 3.4.1). Обчислимо роботу, що здійснює сила тяжіння при цьому переміщенні. Відповідно до визначення механічної роботи ми можемо записати

$$A = m\vec{g}\Delta\vec{r} = mg\Delta r\cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) = -mg\Delta r\sin\alpha = -mg\Delta h = -mg\left(h_2 - h_1\right) \qquad (3.4.1)$$

або

$$A = -mg\Delta h \tag{3.4.2}$$

де h_1 – висота, на якій перебуває тіло над поверхнею Землі в початковому положенні 1, а h_2 – висота в кінцевому положенні 2. У формулі (3.4.1) враховано, що $\cos\left(\frac{\pi}{2}+\alpha\right) = -\sin\alpha$.

При обчисленні роботи сили тяжіння ми нічого не говорили, про траєкторію, по якій рухається наше тіло. Очевидно, що для будь-якої траєкторії, що веде із точки 1 у точку 2, вектор переміщення $\Delta\vec{r}$ буде тим самим, і, згідно (4.4.2), для всіх траєкторій робота сили тяжіння буде мати також те саме значення. Тобто, робота сили тяжіння не залежить від форми траєкторії, а визначається тільки початковою й кінцевою висотою тіла над поверхнею Землі. *Сили, робота яких не залежить від форми траєкторії, за якою тіло переходить із одного положення в інше, а визначається тільки початковим і кінцевим положенням тіла, називаються консервативними.*

Перепишемо формулу (4.4.2) наступним чином.

$$A = -mg\Delta h = -mg(h_2 - h_1) = mgh_1 - mgh_2 \tag{3.4.3}$$

Величину

$$E_n = mgh \tag{3.4.4}$$

називають потенціальною енергією тіла. Враховуючи (3.4.4) рівняння (3.4.3) можна записати так:

$$A = E_{n1} - E_{n2} \tag{3.4.5}$$

До консервативних сил відносяться й сили пружності. Потенціальна енергія пружно деформованого тіла обчислюється за формулою:

$$E_p = \frac{kx^2}{2} \tag{3.4.6}$$

де *k* – коефіцієнт пружності тіла.

Потенціальну енергію часто називають енергією взаємодії. Дійсно, у першому прикладі взаємодіють тіло й Земля, у випадку пружини взаємодіють окремі частини одного тіла (нагадаємо, що сили пружності з'являються при зміні взаємного положення заряджених часток, з яких складається тіло).

Відношення корисної роботи до всієї виконаної роботи називається *коефіцієнтом корисної дії (ККД)***:**

$$\eta = \frac{A_k}{A_з}100\% \tag{3.4.7}$$

де A_k – корисна робота, $A_з$ – затрачена робота.

3.5. Закон збереження та перетворення механічної енергії.

Нехай на частинку діють тільки консервативні сили. Тоді, з однієї сторони, робота по переміщенню тіла із точки 1 у точку 2 визначається виразом (3.4.5): $A_{12} = E_{n1} - E_{n2}$, а з іншого боку, ця робота визначає зміну кінетичної енергії (3.3.5): $A_{12} = E_{к2} - E_{к1}$. Отже,

$$E_{n1} - E_{n2} = E_{к2} - E_{к1}$$

або

$$E_{n1} + E_{к1} = E_{к2} + E_{n2} \tag{3.4.8}$$

Таким чином, ми одержали, що величина $T = E_n + E_к$, для тіла, що перебуває в полі дії консервативних сил, залишається постійною

$$T = E_n + E_к = const \tag{3.4.9}$$

Сума кінетичної і потенціальної енергії тіла є його *повною механічною енергією*.

Таким чином, *повна механічна енергія тіла, яке переміщується в потенціальному полі, залишається сталою.* Це твердження називається *законом збереження механічної енергії* для тіла, що рухається в потенціальному полі. *Потенціальне поле* – це таке поле, робота по переміщенню тіла по замкнутому контурі в якому дорівнює 0.

Для системи тіл закон збереження механічної енергії формулюється так*: повна механічна енергія замкнутої системи тіл, між якими діють консервативні сили, залишається постійною.*

Під дією сил тертя та опору механічна енергія тіл перетворюється в кінетичну енергію хаотичного руху атомів і молекул речовини, а також в потенціальну енергію їх взаємодії. Ця частина енергії тіла називається *внутрішньою.*

З урахуванням зміни внутрішньої енергії, закон збереження енергії, як загальний закон природи, формулюється так: *при будь-яких процесах повна енергія ізольованої системи не змінюється; енергія системи може тільки перетворюватися з однієї форми в іншу і перерозподілятися між частинами системи.*

На рис. 3.5.1 зображено кульку, що падає з висоти h_0 на опору (на плиту). У початковому положенні А (позиція *а*) кулька нерухома, отже її кінетична енергія $E_{кA}$=0, а її повна енергія E_A дорівнює потенціальній енергії кульки, тобто $E_A=E_{nA}$. У точці В (позиція *б*) потенціальна енергія кульки менша за потенціальну енергію цієї кульки в точці А $E_{nB}<E_{nA}$, бо частина початкової потенціальної енергії перетворилась на енергію руху. Таким чином, повна механічна енергія кульки в точці В є сумою кінетичної і потенціальної енергії кульки, тобто $E_B=E_{nB}+E_{кB}$ (позиція *б*).

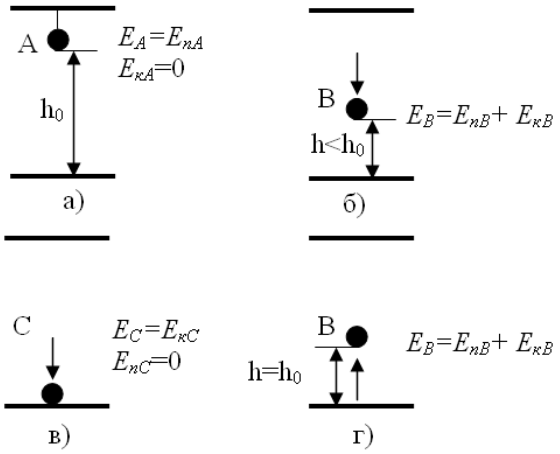


Рис. 4.5.1.

У точці С (у момент падіння кульки, позиція *в*) кулька має лише кінетичну енергію, тобто $E_C=E_{кC}$, E_{nC}=0. Внаслідок виникнення сил пружності при деформуванні кульки і плити кулька починає рухатись угору – пружно відскакує від плити. У точці В (позиція *г*) ситуація буде така сама, як і в позиції *б*, тобто повна механічна енергія тіла буде сумою $E_B=E_{nB}+E_{кB}$. Якби не було тертя й опору повітря, то *повна механічна енергія кульки залишилась б незмінною*.

3.6. Коливальний рух. Величини, що характеризують коливальний рух.

Коливання – це рухи або процеси, які повторюються у часі. Залежно від фізичної природи коливання поділяються на: *механічні, електричні, електромеханічні, електромагнітні, акустичні.* Залежно від зовнішньої дії коливання можуть бути: *вільними* – здійснюються за рахунок енергії, що була початково надана системі, *вимушеними* – здійснюються за рахунок енергії, яку система одержує в процесі руху.

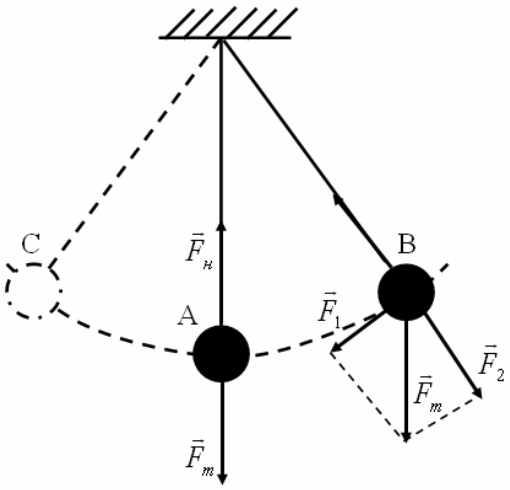


Рис. 3.6.1.

Приклади коливань: коливання гойдалок, коливання листя, дерев під дією вітру. Будь-який рух людського тіла теж з плином часу повторюється і його теж можна віднести до коливальних рухів. Найбільш

поширеними механічними коливальними системами є: тіло підвішене на довгій нитці – математичний маятник (рис.3561.1) та вантаж, закріплений на пружині – пружинний маятник (рис. 3.6.2).

Математичний маятник – це підвішена на невагомій нерозтяжній нитці матеріальна точка, яка під дією сили тяжіння може здійснювати періодичні коливання.

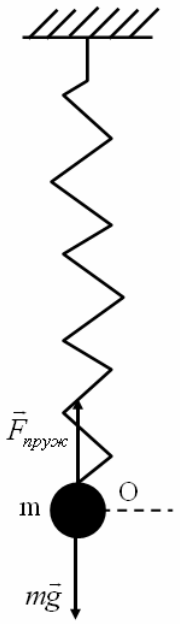


Рис. 3.6.2.

Пружинний маятник – це тверде тіло, підвішене на абсолютно пружній невагомій пружині, яке під дією пружної сили може здійснювати гармонічні коливання.

Для того, щоб існували коливання, необхідно щоб виконувались наступні умови: *наявність коливальної системи; точка рівноваги; запаси енергії; мале значення сил тертя*.

Коливальна система – це система, в якій можуть існувати коливання. У будь-якої коливальної системи повинна бути точка рівноваги (на рис. 3.6.1 точка А, на рис. 3.6.2. точка О).

В коливальній системі повинні бути обов'язково запаси енергії, які призводять до того, що відбуваються коливання. Адже коливання самі по собі не можуть виникати, ми повинні вивести систему з рівноваги, щоб відбувалися ці коливання. Крім того, сила тертя в коливальній системі повинна бути невелика. Якщо ця сила тертя буде великою, то про коливання мови йти не може.

Коливання називаються *гармонічними*, якщо їх характеристики (наприклад, зміщення тіла з положення рівноваги) змінюються у часі за законом синуса або косинуса.

$$x = A\sin\left(\omega_0 t + \varphi_0\right) \qquad (3.6.1)$$

x – зміщення (відхилення) тіла від положення рівноваги [x]=м; A – амплітуда коливань – найбільше відхилення тіла від положення рівноваги ([А]=м); $\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$ – фаза коливань, визначає положення тіла у момент часу t; φ_0 – початкова фаза коливань, визначає положення тіла у момент часу t=0; ω_0 – власна циклічна частота.

Часто амплітуду плутають з розмахом коливань. *Розмах* – це відхилення тіла під час коливання з однієї крайньої точки до іншої (від точки В до точки С на рис. 3.6.1), а *амплітуда* – найбільше відхилення тіла від положення рівноваги (від точки А до точки В на рис. 3.6.1).

Деякі фізичні характеристики коливань матеріальної точки (наприклад, період, частота, циклічна частота) дуже схожі на характеристики руху матеріальної точки по колу.

Період – час здійснення одного повного коливання:

$$T = \frac{t}{N} \qquad (3.6.2)$$

N – кількість коливань за час t. Період вимірюється в секундах: $[T] = c$.

Число коливань, що здійснює тіло за одиницю часу, називають частотою коливань:

$$\nu = \frac{N}{t} \qquad (3.6.3)$$

$[\nu] = Гц\,(герц)$, герц=$с^{-1}$.

Кількість коливань за 2π секунд називається циклічною частотою. Зв'язок між періодом і циклічною частотою коливань має вигляд:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu \qquad (3.6.4)$$

Щоб знайти швидкість коливань, треба знайти похідну по часу від лівої і правої частини рівняння (3.6.1). Знайдемо швидкість:

$$\vartheta = \frac{dx}{dt} = A\omega_0 \cos(\omega t + \varphi_0) = A\omega_0 \sin\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right)$$

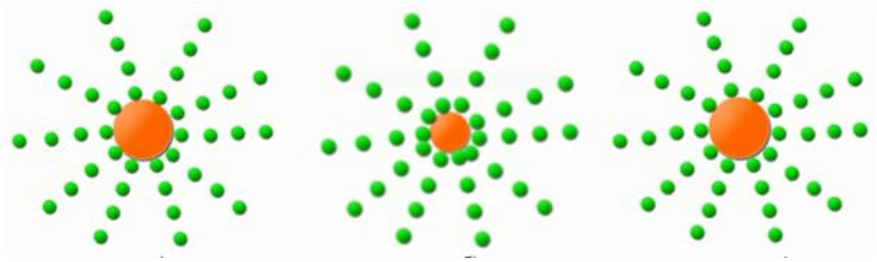
Прискорення визначатиметься першою похідною від швидкості або другою похідною від зміщення:

$$a = \frac{d\vartheta}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -A\omega_0^{\,2} \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = A\omega^{\,2} \sin(\omega_0 t + \varphi_0 + \pi)$$

3.7. Поширення коливань у пружному середовищі. Поздовжні і поперечні хвилі.

Крім просто коливального процесу у вузькій області простору, можливо ще й поширення цих коливань в середовищі. Такі коливання можуть поширюватись у пружних середовищах. *Пружним* називається таке середовище, частинки якого зв'язані між собою пружними силами (наприклад, повітря, вода).

Помістимо в пружне середовище кулю (рис. 3.7.1 (а)). Куля буде стискатися, зменшуватися в розмірах (рис. 3.7.1 (б)), а потім розширюватися (рис. 3.7.1 (в)), на зразок биття серця. В цьому випадку частинки, які прилягають впритул до цієї кулі, будуть повторювати її рух, тобто віддалятися, наближатися – тим самим будуть здійснювати коливання. Оскільки ці частинки взаємодіють з іншими більш віддаленими від кулі частинками, то вони також будуть здійснювати коливання, але з деяким запізненням. Таким чином, коливання буде поширюватися по всіх напрямках, тобто буде відбуватися поширення стану коливань. Таке поширення стану коливань називаємо хвилею. Процес поширення коливань у пружному середовищі з плином часу називається *механічною хвилею*.



а б в

Рис. 3.7.1.

Варто відзначити, що хвиля не переносить речовини, адже частинки здійснюють коливання біля положення рівноваги, але разом з тим хвиля переносить енергію.

Хвилі бувають *поздовжніми* і *поперечними*. У випадку поздовжньої хвилі частинки середовища коливаються у напрямі поширення хвилі. Поздовжні хвилі поширюються у середовищах, де виникають пружні сили при деформаціях стиску (розтягу), тобто у твердих тілах, рідинах і газах. І приклад з пульсуючим кулею (рис. 3.7.1) всередині пружного середовища – це якраз приклад утворення поздовжньої хвилі. Така хвиля являє собою чергування поширення в просторі з плином часу ущільнення і розрідження середовища (рис. 3.7.2). *Поздовжньої називається хвиля*, при поширенні якої частинки середовища роблять коливання уздовж напрямку поширення хвилі (рис. 3.7.3). Швидкість поширення поздовжньої хвилі:

Рис. 3.7.2.

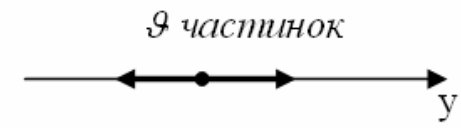


Рис. 5.2.3.

$$\vartheta = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad (3.7.1)$$

де E – модуль Юнґа, ρ – густина середовища.

Поперечні хвилі можуть існувати тільки в твердих тілах і на поверхні рідини. В даному випадку грає роль одна із різновидів деформації, яка може виникати у твердих тілах та на поверхні рідини. *Поперечною називається хвиля*, при поширенні якої частинки середовища роблять коливання перпендикулярно до напрямку поширення хвилі (рис. 3.7.4).

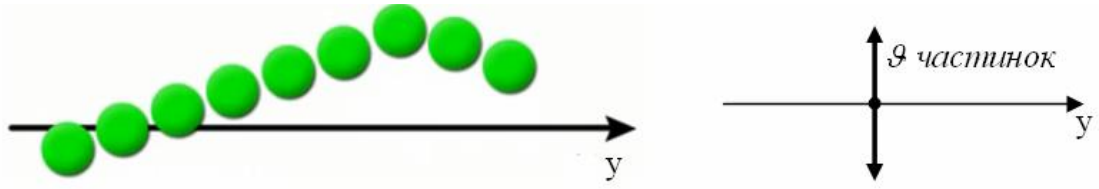


Рис. 3.7.4.

Швидкість поширення поперечної хвилі:

$$\vartheta = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \qquad (3.7.2)$$

де G – модуль зсуву, ρ – густина середовища.

Для опису хвиль поряд з такими характеристиками, як амплітуда, період, частота, фаза використовують поняття:

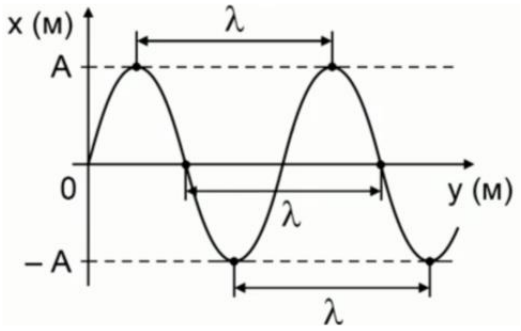


Рис. 3.7.5.

- *хвильовий фронт* – геометричне місце точок середовища, до яких доходять коливання в даний момент часу;
- *хвильова поверхня* – геометричне місце точок, які коливаються в однаковій фазі. За формою хвильової поверхні розрізняють плоскі, сферичні і інші хвилі;
- *промінь* – лінія, перпендикулярна до хвильової поверхні;
- *довжина хвилі* (λ) – це відстань, яку проходить хвиля за час, що дорівнює одному періоду. Інакше кажучи: λ – це відстань між найближчими точками середовища, що коливаються в однакових фазах (рис. 3.7.5);

швидкість хвилі (ϑ) – швидкість поширення постійної фази хвилі:

$$\vartheta = \frac{\lambda}{T} = \lambda\nu \qquad (3.7.3)$$

- *хвильове число* – $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Важливо зауважити, що при переході хвилі з одного середовища в інше змінюються такі її характеристики: швидкість руху та її довжина, а ось частота коливання не змінюється.

3.8. Джерела звуку. Звукові коливання. Висота, тембр, гучність.

Тіло, що коливається, в навколишньому середовищі створює механічні хвилі, які можуть поширюватися тільки завдяки пружним властивостям середовища. Коли такі

хвилі досягають вуха людини, вони спричиняють виникнення вимушених коливань барабанної перетинки і людина чує звук. Отже, механічні хвилі, що викликають у людини відчуття звуку, називаються *звуковими*. Оскільки при цьому звукові хвилі поширюються в повітрі, то ці хвилі *поздовжні*.

У поздовжніх хвилях коливання частинок приводять до того, що в газі виникають ділянки згущень і розріджень, які змінюють одна одну. Відстань між двома послідовними згущеннями або розрідженнями – це довжина хвилі λ. Отже, повітря – провідник звуку. Це довів 1660 року Р. Бойль на досліді. Відкачавши повітря з-під ковпака демонстраційного повітряного насоса, ми не почуємо звучання електричного дзвінка, розміщеного під ним

Відчуття звуку виникає тільки за певних частот коливань у хвилі. Для того, щоб людина чула звук, потрібне джерело звуку. Джерелами звуку можуть бути будь-які тіла, що коливаються з частотою, яка потрапляє у чутний діапазон. У більшості випадків – це тверді тіла (струни, мембрани, п'єзопластинки тощо).

Між джерелом і вухом має знаходитись пружне середовище. Дослід показує, що для органу слуху людини звуковими є тільки такі хвилі, в яких коливання відбуваються з частотами від 16 до 20000 Гц. За частотою коливань звукові хвилі класифікують так: *інфразвук* (0-16 Гц), *чутний звук* (16-20000 Гц), *ультразвук* (20000 Гц-103 МГц), *гіперзвук* (понад 103 МГц) (рис. 5.3.1).

Рис. 3.8.1.

Звук ще повинен мати потужність, достатню для його сприйняття.

Перейдемо до обговорення характеристиків звуку. Перша – це висота звуку. *Висота звуку* – характеристика, яка визначається частотою коливань. Чим більше частота у тіла, яке виробляє коливання, тим звук буде вищим.

Наступна характеристика – *тембр* звуку. Тембром називається забарвлення звуку. Тембр – це те, чим відрізняються два однакових звуки, створені різними музичними інструментами. Ви всі знаєте, що є всього сім нот. Якщо ми почуємо одну і ту ж ноту *ля*, взяту на скрипці і на фортепіано, то ми зможемо їх відрізнити, тобто сказати, який інструмент цей звук створив. Саме цю особливість, забарвлення звуку, характеризує тембр. Тембр залежить від того, які відтворюються звукові коливання, крім основного тону. Справа в тому, що довільні звукові коливання досить складні. Вони складаються з набору окремих коливань, кажуть спектру коливань. Саме відтворення додаткових коливань (обертонів) і характеризує красу звучання того чи іншого голосу або інструменту. Тембр є одним з основних і яскравих проявів звуку.

Ще одна характеристика – *гучність*. Гучність звуку залежить від амплітуди коливань. Якщо взяти камертон (металевий інструмент у формі вилки, який при ударі видає звук завжди однакової частоти) і слабко вдарити по ньому, то амплітуда коливань буде невелика і звук буде тихий. Якщо тепер по камертонові вдарити сильніше, то і звук буде набагато голоснішим. Це пов'язано з тим, що амплітуда коливань буде набагато більшою.

Звуки поділяють на музикальні *тони і шуми*. *Музикальним тоном* називають звук довільної частоти, який створюється тілом, що коливається. *Шум* є складним звуком, що утворюється в результаті тривалих неперіодичних коливань різних джерел звуку (шум моря, дерев у лісі, натовпу тощо). Рівень шуму, його сила (інтенсивність) вимірюється в децибелах (дБ).

Музикальні тони мають різну гучність. Найменша зміна гучності, яку може сприймати людина, дорівнює децибелу (1 дБ=0,1 Б (бела)). Рівень гучності звука небезпечний для організму людини становить 180 дБ (інтенсивність звуку – 10^{12} мкВт/м^2).

Наприклад, з навколишніх звуків, гучність звуку шелестіння листя оцінюється в 10 дБ, шепотіння – 20 дБ, вуличного шуму – 70 дБ.

Контрольні запитання до лекції № 3.

1. Що таке коливання? Які види коливаню ви знаєте?
2. Чим відрізняються вільні від вимушених коливань?
3. Дайте визначення математичного та пружинного маятника.
4. Що називається коливальноюсистемою?
5. Які коливання називаються гармонічними?
6. Дайте визначення амплітуді, розмаху та періоду коливань.
7. Що називається механічною хвилею?
8. Яка хвиля називається поздовжньою, а яка поперечною?
9. Що таке хвильовий фронт, хвильова поверхня, промінь, довжина хвилі, швидкість хвилі?
10. Назвіть основні характеристики звуку.
11. Що таке імпульс тіла?
12. Чому дорівнює модуль імпульсу тіла?
13. Що називається імпульсом сили?
14. Розкрийте суть понять: «внутрішні» та «зовнішні» сили.
15. Сформулюйте та математично запишіть закон збереження імпульсу.
16. Що називається пружноюта не пружною взаємодією.
17. Сформулюйте теорему про кінетичну енергію.
18. Які сили називаються консервативними?
19. За якими формуламиможна визначити значення кінетичної та потенціальної енергії.
20. Сформулюйте закон збереження енергії.

ЛЕКЦІЯ 4. ОСНОВИ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ. ЗАКОНИ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ

4.1. Основні поняття молекулярно-кінетичної теорії. Броунівський рух. Маса молекул. Кількість речовини.

Молекулярна фізика – це розділ фізики, в якому вивчаються явища, що відбуваються всередині макроскопічних тіл. Слово „макроскопічний" означає великий, іншими словами це тіла, які складаються з великого числа частинок. В молекулярній фізиці закони механіки застосовуються не до кожної окремої молекули речовини, а до величезної їх сукупності.

Теплові процеси є дуже поширеними в природі і займають друге місце після механічних. Молекулярна фізика займається вивченням і теплових процесів. Теплові явища пов'язані з тим, як ведуть себе частинки, з яких складаються тіла і тому вивчення цих явищ являє собою особливий інтерес. Метою молекулярно-кінетичної теорії (МКТ), як частини молекулярної фізики, є вивчення тих процесів, які відбуваються всередині макроскопічних тіл, властивості цих тіл, вивчення теплових явищ: нагрівання, охолодження, перехід речовини з одного стану в інший. Молекулярно-кінетична теорія пояснює теплові явища в макроскопічних тілах на основі уявлень, що всі тіла складаються з окремих частинок, які рухаються хаотично. Теорію, яка пояснює будову і властивості тіл на основі закономірностей руху і взаємодії молекул, називають *молекулярно-кінетичною теорією.* Перші відомості про МКТ відносяться до V-IV ст. до н.е, а першою людиною, яка використовувала поняття „атом" був древньогрецький учений Демокріт.

В основі молекулярно-кінетичної теорії лежать три важливі положення, підтверджені експериментально і теоретично.

1) Усі тіла складаються з найдрібніших частинок – атомів, молекул, до складу яких входять ще дрібніші елементарні частинки. Атом (з грецького неподільний) – найдрібніша частинка хімічних елементів, молекула (з латинського „маленька маса") – найдрібніша частинка даної хімічної речовини. Діаметр молекули складає порядку 10^{-9} м (не враховуючи молекули органічних сполук, в яких розміри молекул можуть бути значно більшими).

2) Атоми і молекули речовини завжди перебувають у безперервному хаотичному русі, який називається тепловим.

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

Коли між частинками малі відстані (порядку розміру самої частинки, тобто її діаметра), то спостерігається сила притягання, але як тільки ця відстань зменшується, то дуже швидко зростають сили відштовхування. Ці сили мають електромагнітне походження.

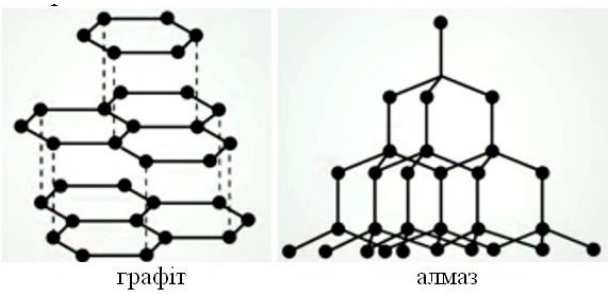


Рис. 4.1.1.

Фізичні властивості речовини визначаються тими хімічними елементами, які входять в молекулу. *Хімічний елемент* – це сукупність атомів, які мають однаковий позитивний заряд ядра. Важливе значення має також взаємне розташування атомів та молекул. Наприклад, графіт і алмаз складаються із атомів карбону, але твердість цих тіл абсолютно різна.

Головним доказом положень МКТ є броунівський рух. Англійський ботанік Роберт Броун вперше спостерігав це явище у 1827 році. Він взяв пилок плауну і розмішав його у воді. Потім каплю цього приготовленого розчину помістив на предметний столик і спостерігав під мікроскопом хаотичний рух спор плауна у воді. Траєкторія руху частинок

була хаотичною і непередбачуваною (рис. 4.1.2). Рух завислих частинок відбувається внаслідок руху молекул води, які вдарялись у завислу частинку (рис. 4.1.3).

Броунівський рух – невпорядкований рух мікроскопічних частинок твердого тіла, зважених в рідині або газі зумовлений тепловим рухом частинок рідини (газу) .

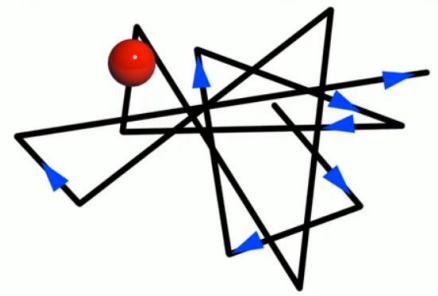


Рис. 4.1.2.

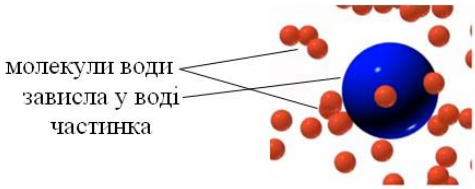


Рис. 4.1.3.

Маса молекули є дуже малою величиною, приблизно 10^{-26} кг. Тому зручно використовувати масу молекули не в кілограмах, а у відносних атомних одиницях маси. У всьому світі прийнята так звана карбонова шкала, де за основу береться атом карбону або молекула карбону. Відносна молекулярна маса визначається формулою:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12}\cdot m_{0(C)}} \qquad (4.1.1)$$

де m_0 – маса даної молекули, $m_{0(C)}$ – маса молекули карбону.

Одиницею вимірювання кількості речовини є моль ν. *Моль* – це кількість речовини, яка містить стільки ж її структурних складових (наприклад, атомів або молекул), скільки міститься атомів в 0,012 кг ізотопу карбону $^{12}C_6$. Це число визначено і носить назву числа Авогадро на честь італійського фізика і хіміка Амадео Авогадро. Позначається це числа через N_A і його числове значення рівне N_A=6,02·10^{23} моль$^{-1}$.

Щоб визначити кількість речовини необхідно число частинок *N*, що входять в дане тіло, поділити на число Авогадро, тобто

$$\nu = \frac{N}{N_A} \qquad (4.1.2)$$

Ще одна величина, яку використовують у молекулярній фізиці є молярна маса. *Молярна маса* – маса одного моля речовини. Позначається ця фізична величина літерою M і обчислюється за формулою:

$$M = m_0 N_A \qquad (4.1.3)$$

де m_0 – маса однієї молекули, N_A – кількість молекул в одному молі $\left([M] = \frac{кг}{моль}\right)$.

Молярна маса визначається із таблиці Менделєєва, де подані значення в *г/моль*. Тому для розв'язку задач необхідно ці значення помножити на коефіцієнт 10^{-3}, щоб подати їх в *кг/моль*. Наприклад, молярна маса гелію (*He*) згідно таблиці Менделєєва рівна 4 *г/моль*, а для розв'язку задач маємо записати так: *M*=4·10^{-3} *кг/моль*.

Для розрахунку кількості атомів або молекул речовини певної маси m користуються формулою:

$$N = \frac{m}{M} N_A \qquad (4.1.4)$$

4.2. Ідеальний газ. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії.

Молекулярно-кінетична теорія виходить із того, що речовина, зокрема газ складається з великої кількості мікроскопічних частинок (молекул), які рухаються хаотично. Частинки стикаються між собою та зі стінками посудини, створюючи на ці стінки тиск.

Подібно до використання в механіці ідеалізованого поняття матеріальної точки, в молекулярній фізиці використовують поняття *ідеального газу.*

Вперше ідея створення моделі „ідеального газу” належить Ломоносову. Великий вклад у розробку такої моделі ввів англійській учений Джоуль, але основна робота була проведена німецьким ученим Клаузіусом. Саме він у 1857 році і ввів це поняття „ідеальний газ”.

Ідеальним називають такий газ, для якого можна знехтувати розмірами молекул та силами молекулярної взаємодії. Молекули ідеального газу дуже маленькі, пружні кульки. Рухаються молекули такого газу хаотично, а їх взаємодія відбувається тільки під час співударянь, причому ці співудари обов’язково повинні бути пружними. За умови достатньо низького тиску і високої температури реальні гази (азот, кисень та ін.) за своїми властивостями близькі до моделі ідеального газу.

Основне рівняння МКТ визначає взаємозв’язок макроскопічних і мікроскопічних параметрів. До мікроскопічних параметрів (ці параметри характеризують одну окремо взяту частинку) відносяться: m_0 – маса молекули газу; ϑ_0 – швидкість молекули газу; p_0 – імпульс молекули газу; $E_к$ – кінетична енергія поступального руху молекули газу. До макроскопічних параметрів (характеризують все тіло в цілому) відносяться: p – тиск газу; V – об’єм газу; T – температура газу.

Основним рівнянням МКТ ідеального газу є математичний вираз тиску газу через концентрацію його молекул, масу кожної молекули і середнє значення квадрату швидкості:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2 \tag{4.2.1}$$

де $n = \frac{N}{V}$ – концентрація молекул (N – кількість молекул в об’ємі V, $[n] = м^{-3}$), m_0 – маса молекули $([m_0] = кг)$, $\bar{v}^2$ – середній квадрат швидкості молекули $\left([\vartheta] = \frac{м}{с}\right)$, p – тиск ($[p] = Па$). Корінь квадратний з цієї величини називають середньою квадратичною швидкістю руху молекул: $\bar{v} = \sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$

Як бачимо з формули (4.2.1) тиск газу пропорційний квадрату швидкості частинок, тобто $p \sim \bar{v}^2$. Якщо швидкість зросте у два рази, то відповідно тиск зросте у чотири рази.

Середня кінетична енергія руху частинки дорівнює:

$$\bar{E}_к = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2} \tag{4.2.2}$$

Враховуючи формулу (4.2.2) вираз (4.2.1) набуде вигляду:

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}_к \tag{4.2.3}$$

З формули (4.2.3) бачимо, що тиск пропорційний кінетичній енергії, тобто $p \sim \bar{E}_к$. Тобто, якщо зростає швидкість, відповідно зростає середня кінетична енергія руху молекул, а отже зростає і тиск газу.

Розглянемо запис:

$$n m_0 = \frac{N}{V} m_0 = \frac{m}{V} = \rho \tag{4.2.4}$$

де m – маса газу; ρ – густина газу. Враховуючи (4.2.4) вираз (4.2.1) можна записати так:

$$p = \frac{1}{3} \rho \bar{v}^2 \tag{4.2.5}$$

Температура – міра нагрітості тіл. Вона являється макроскопічною характеристикою і характеризує протікаючи теплові процеси всередині тіл. Температура – це характеристика теплової рівноваги тіла або системи тіл. Теплова рівновага – це такий стан тіла, при якому його макроскопічні параметри не змінюються на протязі довгого часу.

У 1848 році англійський вчений Вільям Томсон, лорд Кельвін запропонував абсолютну шкалу температур, в якій за абсолютний нуль температури взята така температура, при якій зупиняється поступальний рух молекул. В цьому випадку тиск газу теж буде рівним нулю. Температур менших за цю температуру не існує. 1 градус по шкалі Кельвіна був приведений у відповідність до 1 градусу по шкалі Цельсія. Визначена температура по абсолютній шкалі вимірюється в кельвінах (*K*) позначається літерою *T*. Нуль градусів по шкалі Цельсія відповідає приблизно 273 градуса по Кельвіну, а -273 градусів по шкалі Цельсія відповідає 0 градусам по Кельвіну, тобто

$$0\ ^{O}C=273\ K;\ -273\ ^{O}C=0\ K$$

Формула для переведення температури по шкалі Цельсія у температуру по шкалі Кельвіна має вигляд:

$$T = t\ ^{0}C + 273 \qquad (4.2.6)$$

Австрійському фізику Людвігу Больцману у свій час вдалося знайти співвідношення між середньою кінетичною енергією і температурою. Це співвідношення має вигляд:

$$\overline{E}_{к} = \frac{3}{2}kT \qquad (4.2.7)$$

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

Підставивши (4.2.7) у формулу (4.2.3), одержимо:

$$p = nkT \qquad (4.2.8)$$

Отже вирази (4.2.1), (4.2.3), (4.2.5) та (4.2.8) – це різні записи основного рівняння МКТ.

Контрольні запитання до лекції № 4.

1. Що вивчає молекулярна фізика?
2. Що називається молекулярно-кінетичною теорією?
3. Назвіть основні положення,що лежать воснові МКТ.
4. Що є доказом положень МКТ.
5. Що називається броунівським рухом?
6. Що таке моль?
7. Якийгаз називається ідеальним?
8. Запишіть основні рівняння МКТ.
9. Що таке температура?
10. Як здійснюється переведення температури по шкалі Цельсія у температуру по шкалі Кельвіна?

ЛЕКЦІЯ 5. РІВНЯННЯ СТАНУ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ. ГАЗОВІ ЗАКОНИ ІЗОПРОЦЕСИ. БАРОМЕТРИЧНА ФОРМУЛА

5.1. Рівняння Менделєєва-Клайперона.

Записуючи в різному вигляді основне рівняння МКТ ми бачили, що макроскопічні параметри (тиск, об'єм, температура), що характеризують стан газу пов'язані між собою. Вперше питанням взаємозв'язку макроскопічних параметрів газу займався французький вчений Клайперон. Йому вдалося вивести співвідношення між цими параметрами для постійної маси газу. Згідно з основним рівняння МКТ, ми маємо:

$$p = nkT \tag{5.1.1}$$

Підставивши в останню рівність $n = \frac{N}{V}$, одержимо:

$$p = \frac{N}{V}kT \tag{5.1.2}$$

Оскільки маємо справу з постійною масою газу, отже і кількість молекул газу є постійною, а отже і добуток двох постійних величин є постійною величиною. Тому рівняння (5.1.2) можна записати так:

$$\frac{pV}{T} = const \tag{5.1.3}$$

Рівняння (5.1.3) було одержано у 1834 році Клайпероном і називаються *рівнянням Клайперона* або *об'єднаним газовим законом*.

Через 40 років у 1854 році Менделєєв записав це рівняння для одного моля, а потім для довільної кількості газу. Щоб отримати ці рівняння, запишемо рівність (5.1.2) у вигляді:

$$\frac{pV}{T} = kN \tag{5.1.4}$$

Якщо ми маємо речовину у кількості 1 моль, то вона містить у собі рівно N_A молекул, тобто $N = N_A$. Врахувавши це, рівність (5.1.4) набуде вигляду:

$$\frac{pV}{T} = kN_A \tag{5.1.5}$$

Справа у рівності (5.1.5) маємо дві постійні величини (стала Больцмана та стала Авогадро), а отже і добуток їх також буде постійною величиною: $kN_A = R = 8{,}31\frac{Дж}{моль \cdot K}$. Величину R називають *універсальною газовою сталою*. Отже для одного моля рівняння стану ідеального газу (рівняння Менделєєва-Клайперона) має вигляд:

$$\frac{pV}{T} = R \tag{5.1.6}$$

Для довільної кількості газу, N рівне:

$$N = \frac{m}{M}N_A \tag{5.1.5}$$

Підставивши (5.1.5) у формулу (5.1.5) та, врахувавши, що $\nu = \frac{m}{M}$, одержимо:

$$pV = \frac{m}{M}RT = \nu RT \tag{5.1.8}$$

Рівняння (5.1.8) називається рівнянням Менделєєва-Клайперона або рівнянням стану ідеального газу для довільної кількості газу.

5.2. Газові закони. Ізопроцеси.

Процес у газі – це будь-яка дія, що змінює його стан (нагрівання, охолодження, стиснення). При цьому можуть змінюватись або всі три параметри стану, або два, або тільки один. Процеси, що відбуваються при сталому значенні одного з параметрів стану (*T, V* або *p*) з певною сталою масою газу, називаються *ізопроцесами*. Формули, які описують будь-який із цих ізопроцесів називаються газовими законами.

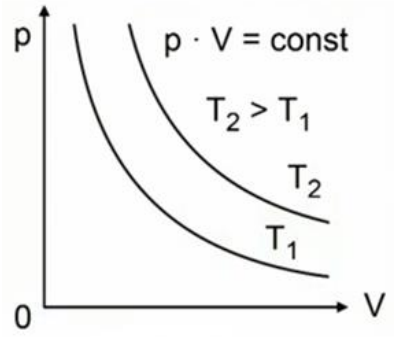


Рис. 5.2.1.

Ізотермічний процес (закон Бойля-Маріотта). Процес зміни стану газу при сталій температурі називається *ізотермічним процесом*, а газовий закон, який відповідає ізотермічному процесу називається *законом Бойля-Маріотта*. Англійський учений Бойль та французький учений Маріотт відкрили цей закон незалежно один від одного приблизно в один і той же час. Звідси і назва цього закону.

Розглянемо рівняння стану газу для незмінної кількості речовини ($\nu = const$). Оскільки ми маємо ізотермічний процес ($T = const$), то рівняння (5.1.8) набуде вигляду: $pV = p_1V_1 = p_2V_2 = ...$ В результаті ми можемо записати, що

$$pV = const \quad (m = const,\ T = const) \tag{5.2.1}$$

Криву залежності тиску газу від його об'єму при сталій температурі називають *ізотермою*. Графічно на діаграмі *p, V* ізотермічний процес зображається рівнобічною гіперболою (рис. 5.2.1).

Ізобарний процес (закон Гей-Люссака). Процес зміни стану газу при сталому тиску називається *ізобарним процесом,* а газовий закон, який відповідає ізобарному процесу називається *законом Гей-Люссака,* оскільки вперше цей процес досліджував французький вчений Гей-Люссак.

Оскільки ми маємо ізобарний процес ($p = const$), то згідно рівняння (5.1.8) маємо: $\frac{V}{T} = \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = ...$ В результаті ми можемо записати, що

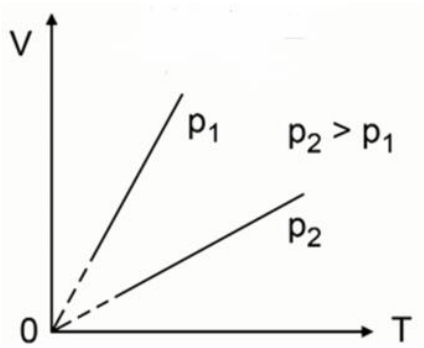


Рис. 5.2.2.

$$\frac{V}{T} = const \quad (m = const,\ T = const) \tag{5.2.2}$$

Графічно на діаграмі *V, T* процес зображається прямою, яку називають *ізобарою* (рис. 5.2.2). Як видно з графіка, об'єм ідеального газу за температури, що прагне до абсолютного нуля, також прагне до нуля – за припущенням ідеальний газ складається з матеріальних точок. Реальні гази не можуть мати нульового об'єму, за досить низьких температур газ перестане відповідати умовам ідеального газу.

Ізохорний процес (закон Шарля). Процес зміни стану газу при сталому об'ємі називається *ізохорним процесом,* а газовий закон, який відповідає ізохорному процесу називається *законом Шарля,* оскільки вперше цей процес досліджував французький вчений Шарль.

Оскільки ми маємо ізохорний процес ($V = const$), то згідно рівняння (5.1.8) маємо: $\frac{p}{T} = \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} = ...$ В результаті ми можемо записати, що

$$\frac{p}{T} = const \quad (m = const,\ V = const) \tag{5.2.3}$$

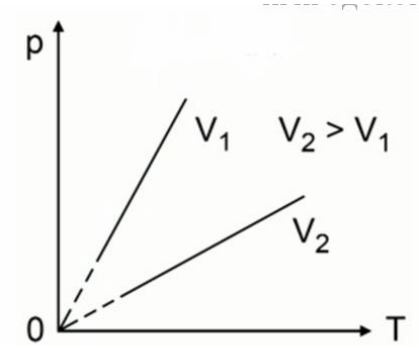


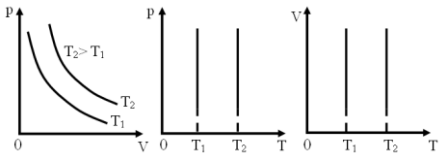
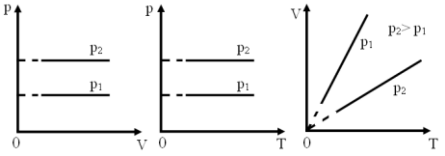
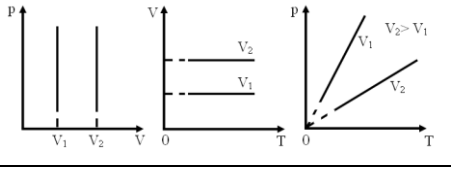
Рис. 5.2.3.

Графічно на діаграмі *p, T* ізохорний процес зображається прямою, яку називають *ізохорою* (рис. 5.2.3).

Варто зазначити, що найпершим був відкритий ізотермічний, потім – ізохорний, а найпізніше – ізобарний процес, а вже потім, на основі цих трьох відкритих газових законів було одержано рівняння Клайперона та рівняння Менделєєва-Клайперона. Є очевидним, що кожен із газових законів є частковим випадком рівняння стану ідеального газу.

Усе сказане, що стосується газових законів, систематизовано та подано у таблиці 5.2.1

Таблиця 5.2.1

Назва процесу	**Сталий параметр**	**Формула газового закону**	**Назва газового закону**	**Графічне представлення газового закону**
Ізотермічний	Температура	$pV = const$ $p_1V_1 = p_2V_2 = ...$	Бойля-Маріотта	
Ізобарний	Тиск	$\frac{V}{T} = const$ $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = ...$	Гей-Люссака	
Ізохорний	Об’єм	$\frac{p}{T} = const$ $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} = ...$	Шарля	

5.3. Барометрична формула.

Дотепер, розглядаючи ідеальний газ, ми не враховували вплив поля сили тяжіння. Однак, на Землі сила тяжіння діє на будь-які тіла, у тому числі й на молекули газу. Якби не було тяжіння, то атмосферне повітря розсіялося б по всьому Всесвіту. А якби не було теплового руху молекул атмосферного повітря, то всі вони впали б на Землю. Тяжіння і тепловий рух приводять до стаціонарного стану газу, при якому його тиск і концентрація зменшується з висотою.

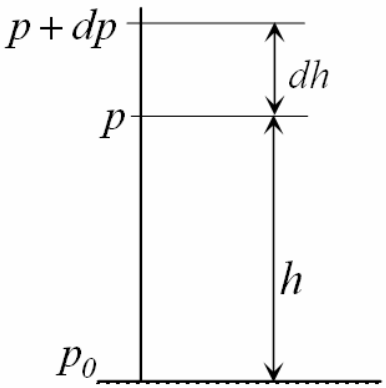


Рис. 5.3.1.

Розглянемо ідеальний газ, маси всіх молекул якого однакові, температура стала і який знаходиться в однорідному полі тяжіння. Якщо тиск газу на висоті *h* дорівнює *p*, то на висоті *h+dh* він дорівнює *p+dp*, причому при *dh>0 dp<0,* оскільки тиск з висотою зменшується (рис. 5.3.1).

Різниця тиску *p* і *p+dp* чисельно дорівнює вазі газу, що знаходиться в об’ємі циліндра заввишки *dh*, а площа основи якого дорівнює одиниці:

$$p - (p + dp) = \rho g dh,$$

де ρ – густина газу на висоті *h*.

Використаємо рівняння Клапейрона-Менделєєва

$$pV = \frac{m}{\mu} RT .$$

Звідси, густина газу

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p\mu}{RT} .$$

Тоді

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

Вважаючи $T = const$ й інтегруючи по тиску від p_0 до p, а по висоті від 0 до h, отримуємо

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

звідси

$$p = p_0 e^{-\frac{\mu g}{RT} h} , \quad h = \frac{RT}{\mu g} ln \frac{p_0}{p} . \qquad (5.3.1)$$

Ці формули називаються *барометричними формулами*. Із них можна зробити висновок, що тиск газу зменшується із висотою експоненціально і тим швидше, чим важчий газ (чим більше μ) і чим нижча температура.

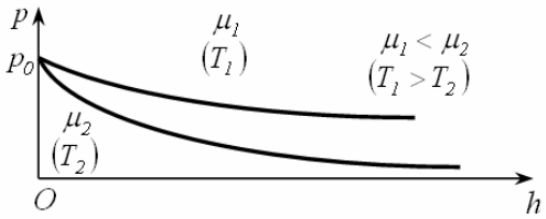


Рис. 5.3.2.

Контрольні запитання до лекції №5.

1. Якими макроскопічними параметрами характеризують стан газу?
2. Запишіть рівняння Клайперона.
3. Вміти математично вивести рівняння Клайперона.
4. Запишіть рівняння Менделєєва-Клайперона.
5. Вміти математично вивести рівняння Менделєєва-Клайперона.
6. Що називається процесом у газі?
7. Що називається ізотермічним процесом?
8. Що називається ізобарним процесом?
9. Що називається ізохорним процесом?
10. Що визначає барометрична формула?

ЛЕКЦІЯ 6. ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

6.1. Внутрішня енергія і робота в термодинаміці.

Макросистемою називається система, що складається з великої кількості частинок. *Термодинаміка* – розділ фізики, в якому вивчаються загальні властивості макроскопічних систем, що знаходяться у стані термодинамічної рівноваги, і процеси переходу між цими станами. Термодинаміка, вивчаючи властивості макроскопічних тіл, не вдається в їх мікроскопічну природу, як молекулярна фізика.

Термодинамічна система – сукупність макроскопічних тіл, що взаємодіють і обмінюються енергією як між собою, так і з іншими тілами (зовнішнім середовищем). При утворенні контакту двох або більше термодинамічних систем на границі їх частинки, співударяючись, обмінюються енергією. Під *теплотою* розуміють передану або одержану енергію через поверхню контакту систем. Термодинамічна система називається *замкненою* або *ізольованою*, якщо відсутній будь-який обмін енергією між нею і зовнішнім середовищем. Стан системи задається термодинамічними параметрами (параметрами стану) – сукупністю фізичних величин, що характеризують властивості термодинамічної системи. Звичайно як параметри стану вибирають температуру, тиск і об'єм. Параметри стану системи можуть змінюватися. Будь-яку зміну в термодинамічній системі, пов'язану із зміною хоч би одного з її термодинамічних параметрів, називають *термодинамічним процесом*. Макроскопічна система знаходиться в термодинамічній рівновазі, якщо її стан з часом не змінюється (передбачається, що зовнішні умови даної системи при цьому постійні).

Одна з основних величин, яка використовується при розв'язанні задач термодинаміки є внутрішня енергія. *Внутрішня енергія* – це кінетична і потенціальна енергія всіх частинок, з яких складається дане тіло. Важливо підкреслити, що ці частинки взаємодіють тільки між собою, і не взаємодіють з частинками оточуючих тіл. Внутрішня енергія позначається літерою U і вимірюється в джоулях: $[U] = Дж$. Виходячи з означення даний вид енергії можна обчислити за формулою:

$$U = E_к + E_п \tag{6.1.1}$$

Розглянемо як термодинамічну систему ідеальний газ. У цьому разі між молекулами відсутні сили взаємодії, тобто потенціальна енергія взаємодії молекул рівна нулю $(E_п = 0)$. Тому внутрішня енергія ідеального газу визначається тільки кінетичною енергією хаотичного теплового руху його молекул. Відомо, що кінетична енергія однієї частинки обчислюється за формулою:

$$E_к = \frac{3}{2}kT \tag{6.1.2}$$

Щоб взнати всю кінетичну енергію системи, необхідно кінетичну енергію однієї частинки помножити на кількість частинок N, де

$$N = \frac{m}{M}N_A \tag{6.1.3}$$

Враховуючи вище сказане, одержимо:

$$U = E_к N = \frac{3}{2}kT\frac{m}{M}N_A \tag{6.1.4}$$

Враховуючи, що $kN_A = R$ – універсальна газова стала, остання рівність набуде вигляду:

$$U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}RT \tag{6.1.5}$$

Якщо ми маємо справу з багатоатомним газом, тобто з газом в якому частинки якимось чином пов'язані між собою, то необхідно ввести поняття ступеня вільності частинки. Ступінь вільності – це число можливих незалежних рухів частинки. Якщо

молекула даного газу багатоатомна, то виникають додаткові можливі енергії взаємодії частинок (енергія коливального чи обертального рухів атомів один відносно одного) і в цьому випадку формула обчислення внутрішньої енергії має вигляд:

$$U = \frac{5}{2}\frac{m}{M}RT \qquad (6.1.6)$$

6.2. Способи зміни внутрішньої енергії. Робота в термодинаміці.

Змінюватися внутрішня енергія термодинамічної системи може тільки в результаті взаємодії системи з іншими тілами (зовнішнім середовищем). Один із способів зміни внутрішньої енергії – здійснення механічної роботи над системою. Наприклад, всуваючи поршень в циліндр з газом, газ стискаємо (здійснюємо роботу), в результаті температура газу підвищується і змінюється (збільшується) внутрішня енергія газу. Енергію, яка передається при цьому термодинамічній системі зовнішніми тілами, *називають роботою*, що здійснюється над системою. Аналогічно і система може виконувати роботу і при цьому буде змінюватися її внутрішня енергія. Наприклад, газ, що розширюється в циліндрі двигуна внутрішнього згоряння, переміщує при цьому поршень і передає йому енергію у формі роботи.

Робота в термодинаміці позначається літерою A і вимірюється в джоулях: $[A] = Дж$. Для ізобарного процесу ($p = const$) робота обчислюється добутком тиску на зміну об'єму, тобто за формулою:

$$A = p\Delta V = p(V - V_0) \qquad (6.2.1)$$

де V_0 та V – відповідно початковий та кінцевий об'єм газу. З формули (6.2.1) бачимо, якщо $V > V_0$, то $A > 0$, а при $V < V_0$ робота від'ємна, тобто $A < 0$.

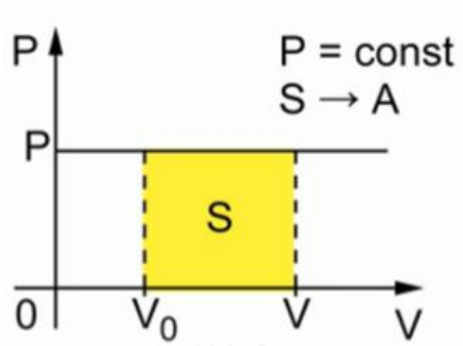


Рис. 6.2.1.

Розглянемо графічне зображення роботи термодинамічної системи. На рис. 6.2.1 подано ізобару ідеального газу в координатній системі p – V. Як бачимо, об'єм газу змінюється від V_0 до V, а тиск залишається постійним. При цьому площа заштрихованої фігури чисельно дорівнює роботі.

Для ізотермічного процесу роботу можна обчислити двома формулами, а саме:

$$A = \frac{m}{\mu}RT\ln\frac{V}{V_0} \qquad (6.2.2)$$

або

$$A = \frac{m}{\mu}RT\ln\frac{p}{p_0} \qquad (6.2.3)$$

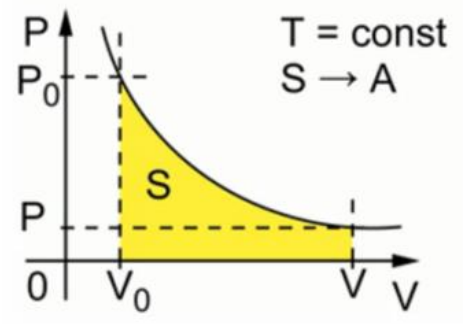


Рис. 6.2.2.

Для ізотермічного процесу графічне представлення роботи показано на рис. 6.2.2. Аналогічно як і в попередньому випадку, площа заштрихованої фігури чисельно дорівнює роботі газу.

Як бачимо з формул (6.2.1-6.2.3) робота може бути як додатною так і від'ємною. Розуміння додатної та від'ємної роботи грає важливу роль в різних газових процесах. Справа в тому, що термодинаміка зародилась як наука про теплотехніку, тобто тоді, коли потрібно було розробляти теплові машини. І тут дуже цікавим є циклічність процесу, який в свою чергу з однієї

сторони пов'язаний з додатною роботою, а з іншої – з від'ємною. Так на рис. 6.2.3. (а) показаний процес, який здійснюється газом при переході із стану **А** в стан **В**. В цьому випадку об'єм газу збільшується, тобто він виконує роботу і ця робота буде додатною. На рис. 6.2.3. (б) газ переходить із стану **В** в стан **А**. В цьому випадку робота буде від'ємною.

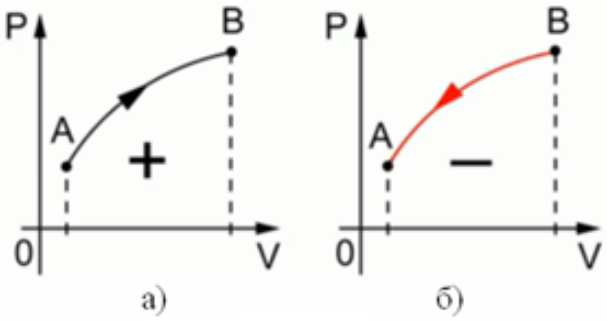


Рис. 6.2.3.

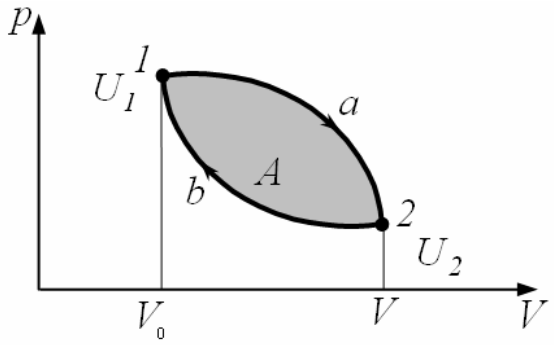


Рис. 6.2.4.

Круговий процес (цикл) – процес, при якому система, проходячи через ряд станів, повертається в початковий стан. На діаграмі *p–V* рівноважний круговий процес зображують замкненою кривою (рис. 6.2.4).

При ізохорному процесі об'єм газу не змінюється (*V=const*), отже робота не виконується, тобто $A=0$.

Інший спосіб зміни внутрішньої енергії – теплообмін. *Теплообмін* – необоротний процес передачі енергії від більш нагрітих тіл (або ділянок тіла) до менш нагрітих без здійснення роботи. Якщо декілька тіл з різними температурами привести до контакту, то між ними здійснюється теплообмін (за рахунок обміну енергіями молекул), в результаті якого відбувається вирівнювання температур. Теплообмін здійснюється шляхом теплопровідності, конвекції і температурним випромінюванням (поглинанням).

Теплопровідність – передача енергії від більш нагрітих частин тіла до менш нагрітих, що приводить до вирівнювання температур. У процесі теплопровідності енергія атомів і молекул більш нагрітих ділянок речовини передається сусіднім, холоднішим. З часом, унаслідок зіткнення молекул, відбувається вирівнювання їх середніх кінетичних енергій, а значить і температури (приклад – нагрівання ложки у стакані з гарячим чаєм).

Конвекція – обмін енергією між рухомими нерівномірно нагрітими частинами газів або рідин. Так, шари газу, стикаючись з тілами вищої температури, нагріваючись, піднімаються вгору, а на їх місце поступають холодніші шари газу – виникає конвективна течія (приклад – обігрів квартир за допомогою батарей).

Температурне випромінювання (поглинання) – передача енергії без безпосереднього контакту тіл, що обмінюються енергією. Полягає у випусканні (поглинанні) тілами електромагнітних хвиль. Відбувається у газах і вакуумі. Температурне випромінювання – універсальний вид теплообміну, що спостерігається завжди за наявності різниці температур між будь-якими тілами і усередині кожного тіла (приклад – теплообмін між Сонцем і Землею).

Енергію, передану термодинамічній системі зовнішніми тілами шляхом теплообміну, називають *теплотою (кількістю теплоти)*, одержуваною системою від зовнішнього середовища. Кількість теплоти позначається літерою Q і вимірюється ця величина в джоулях: $[Q]=Дж$.Таким чином, можна говорити про дві форми передачі енергії від одних тіл до інших: *роботу* і *теплоту*.

6.3. Перший закон термодинаміки. Необоротність теплових процесів.

Перший закон термодинаміки є законом збереження і перетворення енергії у термодинамічних процесах. Він встановлений в результаті дослідів і спостережень упродовж багатьох років і підтверджується всіма ними без винятку.

Раніше ми встановили, що внутрішню енергію термодинамічної системи можна змінити, здійснивши над системою роботу або за допомогою теплообміну. У загальному випадку зміна внутрішньої енергії може відбуватися одночасно при дії обох названих чинників.

Припустимо, що термодинамічна система (газ, поміщений в циліндр під поршнем), мала внутрішню енергією U_1, одержала певну кількість теплоти Q і, переходячи в новий стан, що характеризується внутрішньою енергією U_2, здійснила роботу A над зовнішнім середовищем, тобто проти зовнішніх сил. Кількість теплоти позитивна, коли вона підводиться до системи, а робота позитивна, коли система здійснює її проти зовнішніх сил. Відповідно до закону збереження енергії при будь-якому способі переходу системи з першого стану в другий зміна внутрішньої енергії $\Delta U = U_2 - U_1$ буде однаковою і рівною різниці між кількістю теплоти Q, одержаною системою, і роботою A, здійсненою системою проти зовнішніх сил:

$$\Delta U = Q - A \qquad (6.3.1)$$

або

$$Q = \Delta U + A \qquad (6.3.2)$$

Рівняння (6.3.2) виражає перший закон термодинаміки: *теплота, що передається системі, витрачається на зміну її внутрішньої енергії і на здійснення нею роботи проти зовнішніх сил.*

Якщо система повертається в початковий стан, то зміна її внутрішньої енергії дорівнює нулю: $\Delta U = 0$. Тоді згідно з першим законом термодинаміки (рівняння 6.3.2) маємо, що $A = Q$, тобто вічний двигун першого роду *(періодично діючий двигун, який здійснював би більшу роботу, ніж передана йому ззовні енергія)* неможливий (одне з формулювань першого закону термодинаміки).

Якщо системі не передається кількість теплоти, тобто $Q = 0$, то згідно з рівняння (6.3.2) маємо:

$$A = -\Delta U, \qquad (6.3.3)$$

тобто робота може виконуватись за рахунок зменшення внутрішньої енергії системи. Якщо внутрішня енергія зменшиться до нуля, то робота виконуватись не буде. Звідси випливає ще одне означення вічного двигуна: *вічний двигун – це пристрій, який здійснює роботу без використання палива або яких-небудь інших матеріалів*.

Перший закон термодинаміки виражає закон збереження і перетворення енергії стосовно термодинамічних процесів і не дозволяє визначити напрям протікання процесів. Щоб надалі говорити про можливі напрями протікання термодинамічних процесів, розділимо всі процеси, які можуть відбуватися реально, на два класи: *оборотні й необоротні.*

Термодинамічний процес називають *оборотним*, якщо він може відбуватися як у прямому, так і у зворотному напрямі, причому якщо такий процес відбувається спочатку в прямому, а потім у зворотному напрямі і система повертається в початковий стан, то в навколишньому середовищі і в цій системі не відбувається ніяких змін. Всякий процес, що не задовольняє цим умовам, є *необоротним*.

Можна уявити собі багато процесів, при яких виконується закон збереження енергії, але в природі вони не існують. Наприклад, при контакті гарячого тіла з холодним теплота завжди переходить від гарячого до холодного тіла, а не навпаки. Згідно з першим законом термодинаміки, можливий теплообмін від більш нагрітого тіла до менш нагрітого, але можливий і зворотний перехід (хоча зворотний перехід у природі не здійснюється!). Таким чином, спрямованість так само, як безповоротність, термодинамічних процесів не випливає з першого закону термодинаміки. Другий закон (друге начало) термодинаміки був виявлений на основі аналізу роботи теплових двигунів і узагальнення безлічі дослідних даних. Він визначає напрям протікання термодинамічних

процесів, відображаючи їх безповоротність у природі, і вказує, які процеси в природі можливі, а які ні.

Існує кілька формулювань другого закону. Вперше визначення другого закону термодинаміки дав німецький вчений Клаузіус у 1650 році: *неможливий самодовільний перехід тепла від менш до більш нагрітого тіла, або неможливі процеси, єдиним кінцевим результатом яких був би перехід тепла від менш до більш нагрітого тіла.*

Той факт, що, наприклад, у холодильнику відбувається перехід тепла від холодильної камери в кімнату, не суперечить цьому твердженню, оскільки цей процес не є самодовільним: для його здійснення споживається електрична енергія.

Ще одне формулювання другого закону термодинаміки дав у 1651 році англійський вчений Кельвін: *неможливі процеси, єдиним кінцевим результатом яких було би перетворення тепла цілком у роботу.*

6.4. Принцип роботи теплового двигуна.

Тепловими двигунами називають машини, у яких внутрішня енергія палива частково перетворюється в механічну енергію. У тепловому двигуні роботу виконує сила тиску нагрітого газу (пари) при розширенні. Цей газ (або пару) називають *робочим тілом теплового двигуна*. Нагрівають пару за рахунок згоряння палива. Таким чином, у тепловому двигуні відбуваються такі перетворення енергії:

1) при згорянні палива його внутрішня енергія перетворюється у внутрішню енергію нагрітої пари (газу);

2) розширюючись, пара (газ) виконує роботу, при цьому внутрішня енергія пари (газу) частково переходить у механічну енергію.

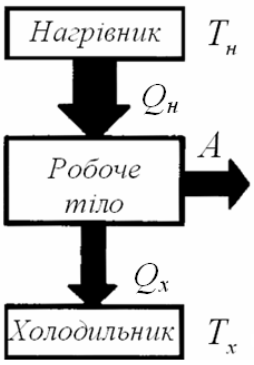


Рис. 6.4.1.

Всі теплові двигуни складаються з трьох основних частин (рис. 6.4.1): нагрівник, робоче тіло, холодильник. Робоче тіло двигуна (газ), розширюючись під час взаємодії з нагрівником та одержуючи від нього кількість теплоти $Q_н$, виконує роботу проти зовнішніх сил. Повертається газ до початкового стану під зовнішньою дією і при цьому віддає кількість теплоти Q_x охолоджувачу („холодильнику"), яким, як правило, є навколишнє середовище. Робота, яку виконує газ при розширенні, обчислюється за формулою:

$$A = Q_н - Q_x \qquad (6.4.1)$$

де $Q_н$ – кількість теплоти, що отримує робоче тіло від нагрівника, Q_x – кількість теплоти, що передається холодильнику.

Важливе значення має циклічність роботи двигуна. Розглянемо графічне представлення такого циклу роботи. Коли ми переводимо газ з точки 1 в точку 2 (рис. 6.4.2), газ розширюється від об'єму V_1 до об'єму V_2 і, відповідно, виконує роботу. В цьому випадку робота, яка виконується газом вважається додатною. На ділянці 2-3 об'єм газу не змінюється і робота, відповідно, дорівнює нулю. Переведення газу з точки 3 в точку 4 здійснюється зовнішніми силами і в цьому випадку робота є від'ємною, адже об'єм зменшується від V_2 до V_1. На ділянці 4-1 об'єм газу не змінюється і робота дорівнює нулю.

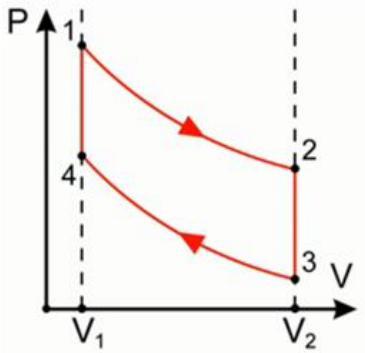


Рис. 6.4.2.

Розглянемо дуже важливу характеристику теплового двигуна, а саме коефіцієнт корисної дії (ККД), який позначається літерою η (читається «ета»). Коефіцієнтом корисної дії називається відношення корисної роботи, що виконується даним двигуном, до кількості теплоти одержаної від нагрівника:

$$\eta = \frac{A}{Q_x} \tag{6.4.2}$$

Враховуючи формулу (6.4.1), останню рівність можна записати так:

$$\eta = \frac{Q_н - Q_x}{Q_н} = 1 - \frac{Q_x}{Q_н} \tag{6.4.3}$$

Формула (6.4.3) дозволяє обчислити ККД реальної теплової машини. Звідси бачимо, що ККД будь-якого теплового двигуна не може бути більшим за одиницю, тобто за 100%.

У XIX столітті, в результаті робіт по теплотехніці, французький інженер Саді Карно запропонував другий спосіб для обчислення ККД. Цей ККД отримав назву максимального коефіцієнта корисної дії. Карно, один із засновників термодинаміки, у 1824 році опублікував роботу „Роздуми про рушійну силу вогню", яку не оцінили його сучасники. У ній вперше були розглянуті питання взаємного перетворення тепла і роботи. Саді підходив до розгляду проблеми з позицій теплороду, вважаючи тепло рідиною, яка втікає у тіло при його нагрівання, і витікає при його охолодженні. Незважаючи на це, отримані ним результати виявились правильним і досі не втратили свого значення. Лише через два роки після смерті Карно у 1834 році цією роботою зацікавився Клапейрон, і користуючись ідеями Карно запропонував цикл, який стали називати циклом Карно.

Цикл Карно складається з двох ізотерм та двох адіабат (рис. 6.4.3). *Адіабатним* називається такий процес, який відбувається без обміну теплотою між термодинамічною системою і оточуючим середовищем ($Q = 0$).

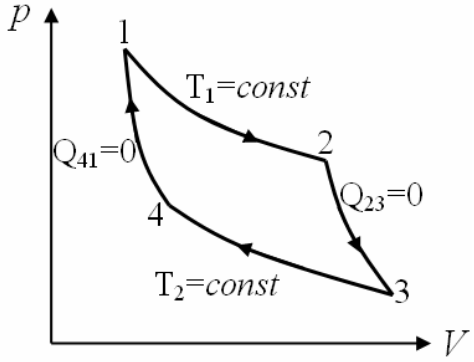


Рис. 6.4.3.

Спочатку система приводиться у тепловий контакт з нагрівачем, що має температуру T_1. Потім нескінченно повільно зменшуючи зовнішній тиск, її заставляють квазістатично розширятись по ізотермі 12. При цьому вона відбирає кількість теплоти $Q_н$ від нагрівача і виконує роботу A_{12} проти зовнішнього тиску. Після цього систему адіабатно ізолюють, тобто повністю виключають теплообмін з оточуючим середовищем, і заставляють її квазістатично розширятись по адіабаті 23, поки її температура не досягне температури холодильника T_2. При адіабатному розширенні система також виконає деяку роботу A_{23} проти зовнішнього тиску. У стані 3 систему приводять у тепловий контакт із холодильником і неперервним збільшенням тиску ізотермічно стискають її до деякого стану 4. При цьому над системою виконується робота (тобто вона виконує від'ємну роботу $-A_{34}$), і вона віддає холодильнику деяку кількість тепла $-Q_x$. Стан 4 вибирається таким чином, щоб можна було б квазістатичним стисканням по адіабаті 41 повернути систему у вихідний стан 1. Для цього над нею треба виконати роботу $-A_{41}$. В результаті циклу Карно внутрішня енергія системи не змінилась. Тоді, згідно з першим началом термодинаміки, виконана робота

$$A = A_{12} + A_{23} - A_{34} - A_{41} = Q_н - Q_x \tag{6.4.4}$$

Максимальне значення ККД ідеальної теплової машини можна знайти по формулі::

$$\eta_{макс} = \frac{T_н - T_x}{T_н} = 1 - \frac{T_x}{T_н} \tag{6.4.5}$$

Максимальний ККД – це не 100%, а те значення, яке можна отримати від даного теплового двигуна.

Коли в умові задачі сказано про ідеальну теплову машину, то вважається, що реальний ККД дорівнює максимальному значенню ККД, тобто $\eta = \eta_{макс}$, або $1 - \frac{Q_x}{Q_н} = 1 - \frac{T_x}{T_н}$. Звідси:

$$\frac{Q_x}{Q_н} = \frac{T_x}{T_н} \tag{6.4.6}$$

Приклади ККД деяких теплових двигунів: перші парові машини – 1% , паровоз – 7-9%, карбюраторний двигун – 20-30%, газова турбіна – 35-40%, ракетний двигун – 47% .

6.5. Властивості рідин. Поверхневий натяг.

Рідина – агрегатний стан речовини, проміжний між газоподібним і твердим. У рідинах спостерігається ближній порядок в розташуванні частинок, тобто їх впорядковане розташування на відстанях, порівнянних з міжатомними. Для частинок рідини характерна велика рухливість. Ці чинники обумовлюють те, що рідини (подібно до твердих тіл) мають малу стисливість і легко (на відміну від твердих тіл) змінюють форму. Оскільки молекули рідини розміщуються впритул одна до одної, то густина рідини набагато більша за густину газів (відстань між молекулами газу в сотні разів перевищує розміри самих молекул).

Кожна молекула рідини протягом деякого часу коливається біля певного положення рівноваги, після чого стрибком переходить в нове положення, віддалене від початкового на відстань порядку міжатомного. Таким чином, молекули рідини поволі переміщуються по всій масі рідини і дифузія відбувається набагато повільніше, ніж в газах. З підвищенням температури рідини інтенсивність коливального руху різко збільшується, зростає рухливість молекул, що, в свою чергу, є причиною зменшення в'язкості рідини.

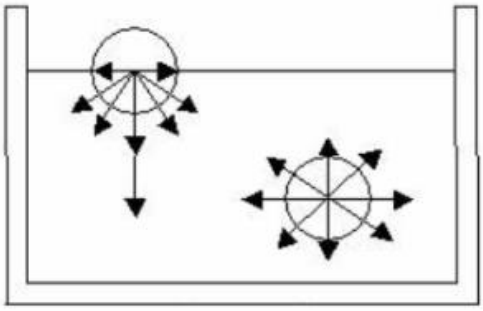


Рис. 6.5.1.

Рідинам властивий поверхневий натяг. Він обумовлений тим, що молекули поверхневого шару відчувають дещо іншу силу міжмолекулярної взаємодії, ніж молекули, які знаходяться всередині об'єму рідини. Насправді, молекула всередині рідини з усіх боків рівномірно оточена іншими молекулами, тому діючі на неї сили в середньому компенсуються (рис. 6.5.1). Таким чином, результуюча сила, що діє на молекулу всередині рідини з боку інших молекул, дорівнює нулю. Густина газоподібного середовища значно менша за густину рідини, тому молекула в приповерхневому шарі менше притягується в бік молекул газу і більше – в бік молекул рідини. Отже рівнодіюча сил, прикладених до кожної молекули поверхневого шару, нулю не дорівнює і направлена всередину. Молекули поверхневого шару рідини під дією результуючої сили втягуються всередину рідини, і число молекул, що знаходяться на поверхні, зменшується до тих пір, поки вільна поверхня рідини не виявиться мінімально можливою.

Під дією поверхневого натягу рідина (за відсутності інших сил) приймає форму кулі (при заданому об'ємі це геометричне тіло має найменшу площу поверхні). Спостерігаючи найдрібніші крапельки, зважені в повітрі, можемо побачити, що вони дійсно мають форму куль, але дещо неідеальних через дію сил земного тяжіння. В умовах невагомості крапля будь-якої рідини (незалежно від її розмірів) має сферичну форму, що доведено в ході експериментів при космічних польотах.

Сумарна енергія частинок рідини складається з енергії їх хаотичного (теплового) руху і потенціальної енергії, обумовленої силами міжмолекулярної взаємодії. Для переміщення молекули з глибини рідини в поверхневий шар треба затратити роботу. Ця робота здійснюється за рахунок кінетичної енергії молекул і йде на збільшення їх потенціальної енергії. Тому молекули поверхневого шару рідини мають більшу потенціальну енергію, ніж молекули всередині рідини. Цю додаткову енергію, яку мають молекули в поверхневому шарі рідини, називають поверхневою енергією, яка є пропорційною площі шару *dS*:

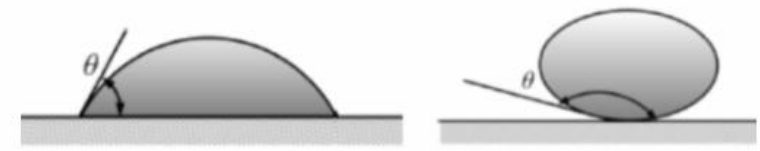
$$dE = \alpha dS$$

де α – коефіцієнт поверхневого натягу.

Поверхневий натяг залежить від домішок, наявних в рідині. Наприклад, наявність у воді найменшої кількості поверхнево-активних речовин (спирт, нафта, тощо) зменшує її коефіцієнт поверхневого натягу. Найбільш відомою поверхнево-активною речовиною по відношенню до води є мило. Деякі речовини (цукор, сіль), навпаки, збільшують коефіцієнт поверхневого натягу. Це пояснюється тим, що їх молекули взаємодіють з молекулами рідини сильніше, ніж молекули рідини між собою. Наприклад, якщо посолити мильний розчин, то у поверхневий шар рідини виштовхується молекул мила більше, ніж у прісній воді. У миловареній техніці мило „висолюється" цим способом з розчину.

6.6. Змочування. Капілярні явища.

Змочування – явище, що виникає при контакті рідини з поверхнею твердого тіла, в результаті якого вільна поверхня рідини скривлюється. Так, крапля води розтікається на склі (рис. 6.6.1 а), тоді як ртуть на тій же поверхні утворює сплюснуту краплю (рис. 6.6.1 б). У першому випадку говорять, що рідина змочує тверду поверхню, в другому – не змочує її.



а б

Рис. 6.6.1.

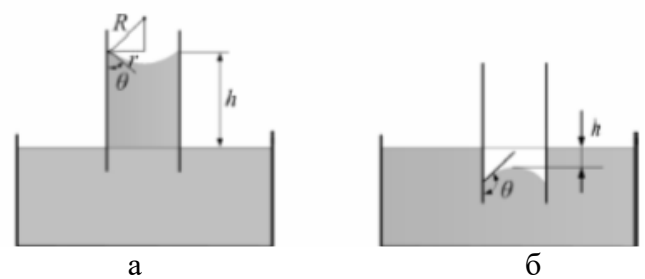
Змочування залежить від характеру сил, що діють між молекулами поверхневих шарів приведених до контакту середовищ. Явище змочування характеризує краєвий кут Θ – кут між дотичними до поверхні рідини і твердого тіла. Рідина змочує тверде тіло, якщо крайовий кут гострий (рис. 6.6.1 а):

$$0 < \Theta < \frac{\pi}{2}$$

Вода змочує скло. Сили притягання між молекулами рідини і твердого тіла тут більші, ніж між молекулами самої рідини, і рідина прагне збільшити поверхню контакту з твердим тілом. Рідина не змочує тверде тіло, якщо крайовий кут тупий (рис. 6.6.1 б):

$$\frac{\pi}{2} < \Theta < \pi$$

Ртуть не змочує скло. Сили притягання між молекулами рідини і твердого тіла в цьому разі менші, ніж між молекулами рідини, і рідина прагне зібратися в кулю. При $\Theta=0$ має місце повне змочування: рідина розтікається по поверхні твердого тіла, покриваючи його тонкою плівкою. При $\Theta=\pi$ має місце повне незмочування: рідина стягується в кульову краплю, маючи лише одну точку дотику.



а б

Рис. 6.6.2.

Якщо помістити один кінець

вузької трубки (капіляр) у широку посудину, наповнену рідиною, то внаслідок змочування або незмочування рідиною стінок капіляра кривизна поверхні рідини в капілярі стає значною. Якщо рідина змочує матеріал капіляра, то всередині його поверхня рідини – меніск – має увігнуту форму (рис. 6.6.2 а), а рівень рідини всередині капіляра вище відкритої поверхні. Якщо рідина не змочує матеріал капіляра, то меніск має опуклу форму (рис. 6.6.2 б), а рівень рідини всередині капіляра нижче відкритої поверхні.

Під увігнутою поверхнею рідини з'явиться негативний надмірний тиск, у результаті рідина в капілярі піднімається, оскільки під плоскою поверхнею рідини в широкій посудині надмірного тиску немає. Якщо рідина не змочує стінки капіляра, то позитивний надмірний тиск приведе до опускання рідини в капілярі. Явища зміни висоти рівня рідини в капілярах називають *капілярними явищами*. Рідина в капілярі піднімається або опускається на таку висоту h, при якій тиск стовпа рідини (гідростатичний тиск) ρgh врівноважується надмірним тиском ΔP:

$$\Delta P = \rho g h \tag{6.6.1}$$

Надмірний тиск створюється силами поверхневого натягу:

$$\Delta P = \frac{F}{S} = \frac{\alpha 2\pi r \cos\Theta}{\pi r^2} = \frac{2\alpha \cos\Theta}{r}$$

r – радіус капіляра, а косинус з'являється тому, що маємо спроектувати силу на вертикальну вісь. Отже висота підйому рідини (опускання в разі від'ємних значень) в капілярі може бути обчислена за формулою

$$h = \frac{2\alpha \cos\Theta}{\rho g r} \tag{6.6.2}$$

З цієї формули виходить, що висота підйому стовпа рідини в капілярі визначається як властивостями рідини, так і радіусом r капіляра. Капілярні явища відіграють велику роль у природі й техніці. Наприклад, вологообмін у ґрунті й рослинах здійснюється за рахунок підняття води по якнайтонших капілярах. На капілярності засновано дію гніту, вбирання вологи бетоном, тощо.

Контрольні запитання до лекції №6.

1. Що називається тепловим двигуном?
2. Які перетворення енергії відбуваються у тепловому двигуні?
3. Назвіть основні частини та їх призначення теплового двигуна.
4. За якою формулою можна обчислити ККД теплового двигуна?
5. Який процес називається адіабатним?
6. За якою формулою можна визначити ККД ідеальної теплової машини?
7. Яка особливість будови рідин?
8. За яких умови рідина змочує, а за яких не змочує поверхню твердого тіла?
9. Які явища називаються капілярними?
10. За якою формулою можна обчислити висоту підйому стовпа рідини в капілярі?
11. Що називається макросистемою?
12. Що вивчає термодинаміка?
13. Що розуміють під теплотою?
14. Що розуміють під внутрішньою енергією системи?
15. Якими способами можна змінювати внутрішню енергію системи?
16. За якою формулою визначається робота при ізобарному, ізотермічному та ізохорному процесах?
17. Що розуміють під круговим процесом?
18. Якими способами можна здійснювати теплообмін?
19. Сформулюйте та математично запишіть перший закон термодинаміки.
20. Сформулюйте одне з визначень другого закону термодинаміки.

ЛЕКЦІЯ 7. ОСНОВИ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ. ЕЛЕКТРОСТАТИКА

7.1. Електричний заряд. Закон Кулона.

Усі тіла в природі здатні електризуватися, тобто набувати електричного заряду. Наявність електричного заряду проявляється в тому, що заряджене тіло взаємодіє з іншими зарядженими тілами. Так, ще в шостому столітті до н.е. давньогрецький вчений Фалес Мілетський описав експеримент, який полягав у натиранні шматка бурштину хутром, після чого бурштин набував здатність притягувати шматочки папірусу, порошинки і т.д.

Подальші дослідження цього питання продовжились у вісімнадцятому столітті. Натиранням різних предметів один одним займався англійський лікар Вільям Гільберт. У результаті своїх дослідів він виявив, що не обов'язково бурштин і хутро можуть давати отриманий Фалесом результат, але обов'язково це мають бути різнорідні тіла. Раз в природі існує особливий вид взаємодії тіл, то необхідно задати властивість тіл, що кількісно описує цю взаємодію. Такою властивістю є електричний заряд.

Існує два види електричних зарядів, які умовно називають *позитивними* і *негативними*. Заряди одного знака відштовхуються, різних знаків – притягуються. Взаємодія між електрично зарядженими частинками або макроскопічними зарядженими тілами називається електромагнітною взаємодією. Розділ фізики, в якому вивчають електромагнітні взаємодії, називається *електродинамікою*. Термін електродинаміка походить від грецьких слів «електрон» – бурштин та «динамо» – сила.

Електростатика – це розділ електродинаміки, в якому розглядаються властивості і взаємодія нерухомих в інерціальній системі відліку електрично заряджених тіл або частинок, що мають електричний заряд.

Електричний заряд (q) – невід'ємна властивість деяких елементарних частинок (електронів, протонів та ін.), що визначає їх взаємодію із зовнішнім електромагнітним полем. [q] = Кл (кулон). 1 Кл=1А·с. Отже, електричний заряд – це не матерія, а лише властивість тіл, тобто заряд не може існувати окремо від тіла.

Подібне розуміння терміна електричного заряду було не завжди. На ранніх стадіях вивчення електродинаміки, вважалося, що заряд – це якась ефірна рідина наявність або відсутність якої в тілі визначає здатність або нездатність тіла до електричного взаємодії. Крапку в суперечці поставили два англійці: Джозеф Томпсон і Ернест Резерфорд. Саме Томпсон в 1897 році відкрив електрон. *Електрон* – елементарна частинка, яка має негативний електричний заряд. Заряд електрона позначається літерою *e*. Подальші дослідження дозволили визначити заряд та масу електрона, а саме: $e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}\,Кл$, $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}\,кг$.

Властивості електричного заряду.

1. Заряд елементарних частинок є однаковий за величиною. Його називають елементарним зарядом q_e=e=1,6·7^{-19} Кл.

2. Заряд тіла утворюється сукупністю елементарних зарядів, тому він є величиною, кратною *e*: q=eN, N=1,2,3… Ця властивість називається дискретністю електричного заряду.

3. Алгебрична сума зарядів електрично ізольованої системи заряджених тіл залишається величиною сталою: $q_1 + q_2 + ... + q_N = const$, або $\sum_{i=1}^{N} q_i = const$.

Це твердження називається законом збереження електричного заряду.

4. Величина заряду не залежить від того, рухається заряд чи ні, тобто, заряд – величина інваріантна.

Закон, який дозволяє знайти силу взаємодії точкових зарядів, був встановлений експериментально в 1785 році Ш. Кулоном (фр. фізик, військовий інженер), за допомогою

крутильних терезів (рис. 7.1.1). На один кінець коромисла він одягав заряджену ним кульку, на другий – нейтральну кульку. Третю точно таку ж кульку, також заряджену, він підносив до першої. При цьому, внаслідок взаємодії двох заряджених тіл, коромисло поверталось. Далі по проградуйованій шкалі він визначав, на скільки провернулось коромисло і таким чином знаходив величину сили (момент сили електричної взаємодії дорівнює моменту сили пружності кручення, яка пропорційна куту повороту).

Рис. 7.1.1

Точковий заряд – це заряджене тіло, розмірами якого можна знехтувати в порівнянні з відстанню від цього тіла до інших заряджених тіл. У результаті дослідів Кулон прийшов висновку:

Сила взаємодії двох нерухомих точкових зарядів пропорційна добутку цих зарядів, обернено пропорційна квадрату відстані між ними і залежить від середовища, в якому знаходяться ці заряди:

$$F = k\frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2} \qquad (7.1.1)$$

де $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9\cdot 10^9 \ \frac{Н\cdot м^2}{Кл^2}$ – коефіцієнт пропорційності в СІ; $\varepsilon_0 = 8{,}85\cdot 10^{-12}\ Ф/м$ – електрична стала; r – відстань між точковими зарядами; ε – діелектрична проникність середовища. Діелектрична проникність середовища – величина, яка вказує у скільки разів сила взаємодії двох зарядів у даному середовищі менша сили взаємодії у вакуумі (для тих же зарядів і відстані між ними). Безрозмірна величина. Для вакууму ε=1.

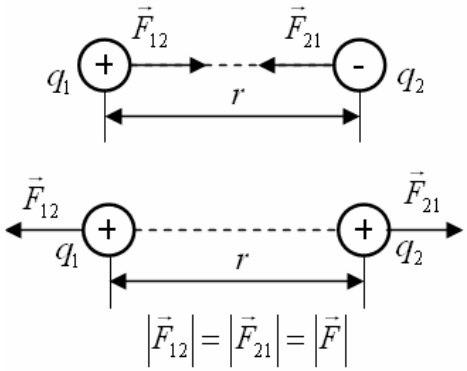


Рис. 7.1.2

Сила взаємодії двох точкових зарядів спрямована вздовж прямої, що їх з'єднує (рис. 7.1.2).

7.2. Електричне поле. Напруженість електричного поля.

Будь-яке електрично заряджене тіло створює в оточуючому його просторі електричне поле, наявність якого довів на початку XIX століття англійський фізик Майкл Фарадей, провівши ряд експериментів. Саме через електричне поле відбувається взаємодія між електричними зарядами, і ця взаємодія відбувається не миттєво, а з скінченною швидкістю, що довів у своїх теоретичних роботах інший англійський фізик Максвел. *Електричне поле* – це матеріальне середовище, що існує навколо заряджених тіл і проявляє себе силовою дією на заряди. Особливістю його є те, що це поле створюється електричними зарядами і зарядженими тілами, а також впливає на ці об'єкти незалежно від того, рухаються вони чи ні.

Якщо електрично заряджені тіла або частинки нерухомі в даній системі відліку, то їх взаємодія здійснюється за допомогою електростатичного поля. *Електростатичне поле* – це електричне поле, що не змінюється в часі.

Для того, щоб знайти і дослідити електричне поле, використовують точковий позитивний заряд, який називають пробним $q_{пр}$. Візьмемо додатній заряд $+q_0$, який створює електричне поле і в це поле помістимо пробний заряд $+q_{пр}$, який буде

знаходитись на деякій відстані від $+q_0$ (рис. 7.2.1). Згідно закону Кулона на заряд, що поміщений в електричне поле буде діяти сила Кулона зі сторони заряду, який створює це поле. Виявилось, що якщо брати різні за величиною пробні заряди, то і сили, які діють на ці заряди в даній точці поля, будуть різними. Проте відношення сили до величини заряду для даної точки поля для всіх пробних зарядів буде одним і тим же. Тому можна прийняти це відношення за величину, яка характеризує електричне поле. Введену таким чином характеристику називають *напруженістю електричного поля* в даній точці.

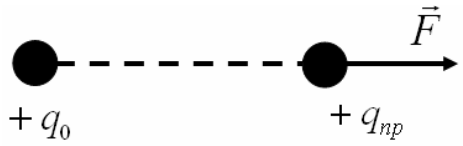
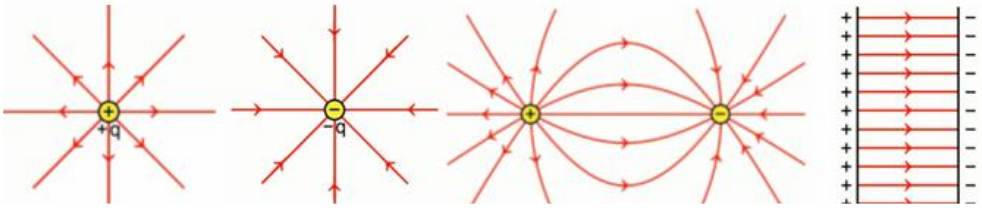


Рис. 7.2.1

Напруженість електричного поля ($\vec{E}$) – векторна фізична величина, силова характеристика електричного поля, що чисельно дорівнює силі, яка діє на одиничний позитивний заряд, що внесений в дану точку поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{пр}} \qquad (7.2.1)$$

[E]=Н/Кл=В/м



а б в г

Рис. 7.2.2

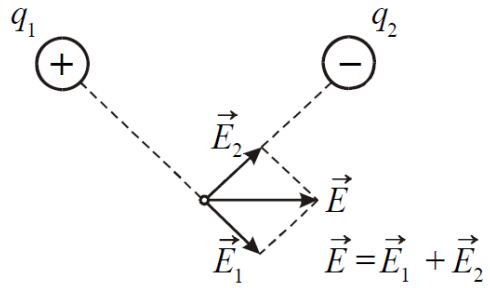
Напруженість електричного поля зображають за допомогою ліній, які називаються силовими лініями або лініями напруженості електричного поля. Напрямок цих ліній показано на рис. 7.2.2: а) для точкового позитивного заряду; б) для точкового негативного заряду; в) для системи точкових зарядів; г) для двох довгих різнойменно заряджених площин.

Лініями напруженості електричного поля називаються неперервні лінії, дотичні до яких в кожній точці співпадають з вектором напруженості поля в даній точці. Ці лінії мають початок і кінець: починаються вони на позитивних зарядах, а закінчуються на негативних.

Якщо величина і напрям вектора напруженості поля в кожній точці однакові, таке поле називається однорідним.

Виходячи із закону Кулона, можна розрахувати напруженість електричного поля, що створюється точковим зарядом q:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{пр}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{\varepsilon r^2} \qquad (7.2.2)$$



Якщо поле створюється декількома зарядами, то результуюча напруженість електричного поля системи зарядів дорівнює векторній сумі напруженостей полів, які створював би кожний із зарядів системи окремо

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + ... + \vec{E}_N = \sum_{i=1}^{N} \vec{E}_i \qquad (7.2.3)$$

Це твердження носить назву *принципу суперпозиції полів*. Принцип суперпозиції дозволяє розрахувати напруженість поля будь-якої системи зарядів.

З формули (7.2.1) бачимо, що на будь-який заряд q, що внесений в електричне поле, діє електрична сила

$$\vec{F}_{ел} = q\vec{E} \tag{7.2.4}$$

7.3. Потенціал електростатичного поля. Різниця потенціалів. Робота з переміщення заряду в електростатичному полі.

Розглянемо електростатичне поле, що створюється нерухомим точковим зарядом q. В це поле внесемо пробний заряд. У будь-якій точці поля на пробний заряд $q_{пр}$ діє сила, яка відповідно до закону Кулона дорівнює: $F = k\frac{qq_{пр}}{\varepsilon r^2}$. Заряд $q_{пр}$ переміщається під дією сил поля заряду q уздовж деякої лінії (рис. 7.3.1). Елементарна робота з переміщення заряду дорівнює

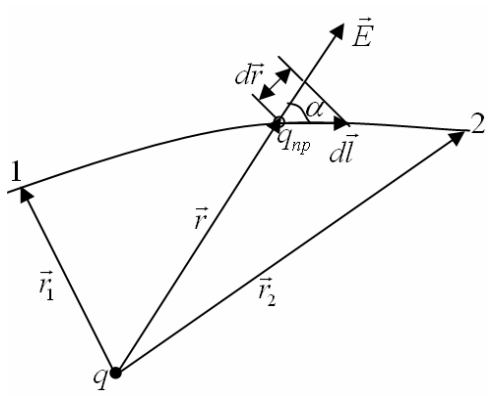


Рис. 7.3.1

$$dA = \vec{F}d\vec{l} = Fdl\cos\alpha \tag{7.3.1}$$

З рис. 7.3.1 бачимо, що $dl\cos\alpha = dr$. При переміщенні заряду $q_{пр}$ з точки 1 в точку 2 виконується робота:

$$A = \int_{r_1}^{r_2} Fdr = \int_{r_1}^{r_2} k\frac{qq_{пр}}{\varepsilon r^2}dr = -\left(k\frac{qq_{пр}}{\varepsilon r_2} - k\frac{qq_{пр}}{\varepsilon r_1}\right) \tag{7.3.2}$$

Величина $k\frac{qq_{пр}}{r}$ називається потенціальною енергією заряду $q_{пр}$ в полі заряду q:

$$W_n = k\frac{qq_{пр}}{\varepsilon r} \tag{7.3.3}$$

Різні пробні заряди $q_{пр1}$, $q_{пр2}$ і т.д. мають в одній і тій же точці поля різну потенціальну енергію W_{n1}, W_{n2} і т.д. Проте відношення потенціальної енергії до величини пробного заряду буде одним і тим же. Цю величину називають *потенціалом у даній точці поля* і використовують для опису електростатичних полів.

Потенціал (φ)– скалярна фізична величина, енергетична характеристика електростатичного поля, що чисельно дорівнює потенціальній енергії, яку мав би в даній точці поля одиничний позитивний заряд:

$$\varphi = \frac{W_n}{q_{пр}} \tag{7.3.4}$$

[φ]=Дж/Кл=В (вольт).

Підставивши (7.3.3) у (7.3.4) отримаємо формулу для розрахунку потенціалу поля точкового заряду:

$$\varphi = k\frac{q}{\varepsilon r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{\varepsilon r} \tag{7.3.5}$$

де k – коефіцієнт пропорційності; q – заряд, що створює поле; r – відстань від заряду до точки, в якій визначається потенціал.

Якщо r прагне нескінченності ($r\to\infty$), то потенціал φ наближається до нуля. Це означає, що потенціал поля точкового заряду дорівнює нулю в нескінченно віддаленій точці.

Робота A, що виконується силами електростатичного поля при переміщенні заряду q з точки 1, потенціал якої φ_1, в точку 2 з потенціалом φ_2 згідно формул (7.3.2) та (7.3.3) дорівнює зменшенню потенціальної енергії:

$$A = -(W_{n2} - W_{n1}) \tag{7.3.6}$$

З формули (7.3.4) випливає, що $W_n = q\varphi$. Отже

$$A = -(q\varphi_2 - q\varphi_1) = q(\varphi_1 - \varphi_2) \tag{7.3.7}$$

Величину $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ називають *різницею потенціалів*. Електричні потенціали прийнято пов'язувати не з абсолютними значеннями потенціалів, а з їх різницею між різними точками простору. Таким чином

$$A = q\Delta\varphi \tag{7.3.8}$$

Потенціал нескінченно віддаленої точки простору приймають за нульовий потенціал. Якщо заряд q з точки, потенціал якої φ, віддаляється на нескінченність (там, де за умовою потенціал рівний нулю), то робота сил електричного поля дорівнює:

$$A_\infty = q\varphi \tag{7.3.9}$$

Звідси випливає, що потенціал чисельно дорівнює роботі, яка виконується силами електростатичного поля під час переміщення одиничного позитивного заряду з цієї точки поля на нескінченність:

$$\varphi = \frac{A_\infty}{q} \tag{7.3.7}$$

На практиці за нульовий потенціал звичайно приймають потенціал Землі.

Якщо поле створюється системою зарядів, то, відповідно до принципу суперпозиції, потенціал результуючого поля дорівнює алгебричній сумі потенціалів, що створюються кожним зарядом окремо:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + ... + \varphi_N = \sum_{i=1}^{N} \varphi_i \tag{7.3.11}$$

Еквіпотенціальна поверхня – це геометричне місце точок електростатичного поля, потенціали яких однакові. Робота, що виконується силами електростатичного поля під час переміщення електричного заряду вздовж однієї і тієї ж еквіпотенціальної поверхні, дорівнює нулю.

7.4. Електроємність. Конденсатори. Енергія зарядженого конденсатора.

Як відомо, явище електризації полягає у розділенні та накопиченні електричного зарядів деякими тілами. Саме властивість накопичувати деякими предметами електричні заряди має дуже велике практичне значення.

Нехай у нас є дві різні за розміром ізольовані банки, підключені до електроскопа (рис. 7.4.1). Якщо до кожної з банок піднести однаково заряджене тіло, то з ними відбудеться процес електризації, і стрілки на обох електроскопах розійдуться, що означає наявність у банок певного потенціалу. Однак виявляється, що електроскоп більшої банки покаже менше відхилення стрілок. Даний експеримент доводить, що різні тіла електризуються одним і тим же зарядом по-різному (більша банка одним і тим же зарядом зарядилася до меншого потенціалу, ніж банка менших розмірів). Отже існує деяка величина, яка показує здатність провідника накопичувати електричний заряд. Ця величина називається електроємністю і позначається літерою C. *Електрична ємність* (електроємність або просто ємність) – це скалярна фізична величина, що характеризує здатність провідника накопичувати електричний заряд і чисельно дорівнює заряду, поміщеного на провіднику до потенціалу цього провідника:

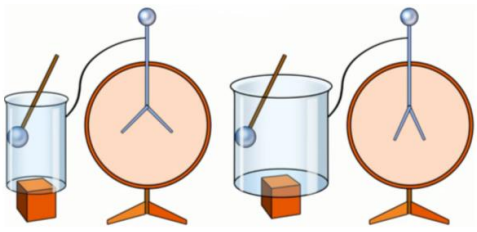


Рис. 7.4.1

$$C = \frac{q}{\varphi} \qquad (7.4.1)$$

$[C] = \frac{Кл}{В} = Ф$ (фарад). Відокремлені провідники мають невелику ємність. На практиці необхідні пристрої, здатні накопичувати на собі („конденсувати”) великі заряди. Їх називають конденсаторами (в перекладі з латинської „згущаю”). Конденсатор – це дві провідникові пластинки, які розташовані близько одна від одною і розділені діелектриком (рис. 7.4.2). Провідники, що утворюють конденсатор називають обкладками. Одна з обкладок заряджається позитивно, інша – негативно. Умовне позначення показано на рис. 7.4.3.

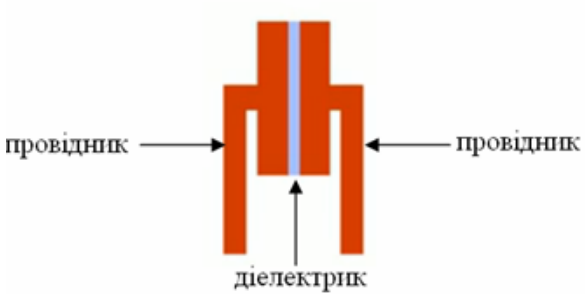


Рис. 7.4.2

Рис. 7.4.3

Відповідно до форми конденсатори бувають: плоскі, циліндричні, сферичні.

Електроємність конденсатора дорівнює відношенню заряду на конденсаторі до різниці потенціалів між обкладками:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U} \qquad (7.4.2)$$

де $\varphi_1 - \varphi_2 = U$ різниця потенціалів між обкладками; q – заряд позитивної обкладки.

Величина електроємності конденсатора визначається формою і розмірами обкладок і величиною зазору між ними, а також діелектричними властивостями середовища, що заповнює простір між обкладками. Для плоского конденсатора електроємність визначається формулою:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} \qquad (7.4.3)$$

S – площа обкладок; d – відстань між обкладками; ε – діелектрична проникність середовища (діелектрика), яке знаходиться між обкладками; $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \frac{Ф}{м}$ – електрична стала.

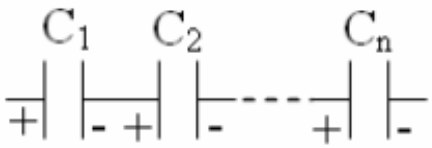


Рис. 7.4.4

Крім електроємності кожний конденсатор характеризується граничною напругою U_{max}, яку можна прикладати до обкладок конденсатора і при якій ще не відбувається пробою. При перевищенні цієї напруги між обкладками проскакує іскра, внаслідок чого руйнується діелектрик і конденсатор виходить з ладу.

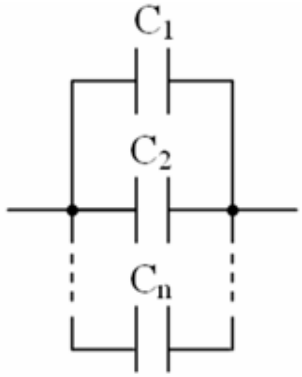


Рис. 7.4.5

Конденсатори можна поєднувати в батареї різними способами. У разі послідовного з’єднання конденсаторів вони з’єднуються різнойменно зарядженими обкладками (рис. 7.4.4). При цьому виконуються наступні співвідношення:

$$q_{заг} = q_1 = q_2 = ... = q_n;\ U = U_1 + U_2 + ... + U_n;$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + ... + \frac{1}{C_n}.$$

Результуюча ємність завжди менше мінімальної електроємності, що входить до батареї. При послідовному

з’єднанні зменшується можливість пробою конденсаторів, тому що на кожному конденсаторі є лише частина загальної різниці потенціалів, що подана на всю батарею.

У разі паралельного з’єднання конденсаторів з’єднуються однойменні обкладки (рис. 7.4..5). При цьому виконуються співвідношення:

$q_{заг} = q_1 + q_2 + ... + q_n$; $U = U_1 = U_2 = ... = U_n$; $C = C_1 + C_2 + ... + C_n$.

Паралельне з’єднання конденсаторів використовують для отримання великої електроємності.

Провідники, на яких накопичується заряд, створюють між собою електричне поле, а значить, конденсатор володіє деякою енергією. Енергія конденсатора, за законом збереження енергії, дорівнює роботі, виконаній по розділенню зарядів і визначається співвідношеннями:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2}$$

де q – заряд; U – різниця потенціалів (напруга) між пластинками конденсатора.

Напруга на обкладках конденсатора пов’язана з напруженістю електричного поля співвідношенням:

$$U = Ed$$

7.5. Електричний струм. Характеристики струму.

Електричним струмом називається напрямлений (впорядкований) рух електричних зарядів. Важливо розуміти, що цей впорядкований рух не обов’язково має поширюватися на всі частинки. Кожна частинка може рухатися хаотично, проте в цілому всі вони зміщується в певному напрямку, і саме це зміщення обумовлює наявність струму.

Якщо електричні заряди не змінюють свого напрямку руху і рухаються з постійною швидкістю, то такий струм називається постійним.

Для протікання струму необхідна наявність в провіднику (або в даному середовищі) заряджених частинок, які можуть переміщатися в межах всього провідника. Такі частинки називаються *носіями заряду (або носіями струму)*. Ними можуть бути електрони, іони або макроскопічні частинки, які несуть на собі заряд, наприклад, заряджені порошинки. Струм виникає за умови, що усередині провідника існує електричне поле.

Струм, що виникає в провідних середовищах, називається *струмом провідності.* Прикладом струму провідності є струм в металах. Для існування електричного струму провідності необхідне виконання наступних умов:

1. Наявність вільних носіїв заряду.

2. Наявність зовнішнього електричного поля, енергія якого повинна витрачатися на впорядковане переміщення електричних зарядів.

3. Коло постійного струму провідності повинно бути замкненим.

Кількісною характеристикою електричного струму є сила струму. *Сила струму* (I) – скалярна фізична величина, що чисельно дорівнює заряду, який переноситься через поперечний переріз провідника за одиницю часу:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \qquad (7.5.1)$$

$[I] = \frac{Кл}{с} = А$ (ампер (на честь французького фізика Андре-Марі Ампера)).

За напрям струму умовно беруть напрям руху позитивних зарядів. Якщо сила струму і його напрям не змінюються, то струм називається постійним. Для постійного струму маємо:

$$I = \frac{q}{t} \qquad (7.5.2)$$

Прилад призначений для вимірювання сили струму називається амперметром.

Іншою характеристикою струму є густина струму. *Густина струму* ($\vec{j}$) – векторна фізична величина, яка чисельно дорівнює електричному заряду, що переноситься за одиницю часу через одиничну площадку, розташовану перпендикулярно до напряму руху носіїв заряду.

$$j = \frac{q}{tS} = \frac{I}{S} \tag{7.5.3}$$

S – площа поперечного перерізу провідника ($\vec{j}$ [А/м^2]).

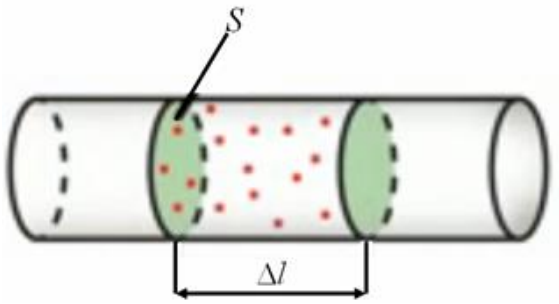


Рис. 7852.1

Електричний струм можна характеризувати за його дією. Розрізняють три основні дії струму: *теплова* (при пропусканні струму через провідник відбувається активне виділення тепла); *хімічна* (струм може впливати на хімічну структуру речовини); *магнітна* (струм ініціює наявність магнітного поля).

Електричний струм може характеризуватися швидкістю руху електричного заряду. Візьмемо певний провідник по якому протікає електричний струм (рис. 8.2.1). За час Δt через поперечний переріз S пройдуть всі ті електрони, що знаходяться в просторі провідника, обмеженому довжиною Δl (відстань, яку пройдуть електрони за час Δt). Тому Δq можна порахувати як:

$$\Delta q = q_0 nS\Delta l \tag{7.5.4}$$

де q_0 – заряд однієї частинки; n – концентрація частинок; S – площа поперечного перерізу провідника; Δl – відстань, яку проходять заряди за одиницю часу.

Підставивши (7.5.4) у (7.5.1), одержимо:

$$I = \frac{q_0 nS\Delta l}{\Delta t} \tag{7.5.5}$$

Підставимо замість елементарного заряду q_0 модуль заряду електрона, тобто $q_0 = e$, та врахуємо, що $\vartheta = \frac{\Delta l}{\Delta t}$ – швидкість руху зарядів. Тоді формула (7.5.5) набуде вигляду:

$$I = ne\vartheta S$$

7.6. Закон Ома для ділянки кола. Опір.

Рис. 7.6.1

Електричний струм в провіднику може існувати тоді, коли на кінцях цього провідника існує різниця потенціалів, яку називають напругою і напрямлений у сторону зменшення потенціалу (струм за домовленістю обумовлений рухом позитивних зарядів, а вільні електрони, відповідно, рухаються у зворотний бік, рис. 7.6.1). Припустимо, що на кінцях ділянки провідника існують потенціали φ_1 та φ_2, причому виконується умова: $\varphi_2 > \varphi_1$. В цьому випадку напруга на ділянці (або різниця потенціалів) рівна:

$$U = \varphi_2 - \varphi_1 \tag{7.6.1}$$

$[U] = B$ (вольт).

Експериментальним шляхом була показано, що чим більше напруга на ділянці, тим більша сила струму проходить через нього. Більш докладно це питання розглянув німецький фізик Георг Ом. Для різних провідників він будував так звані вольт-амперні характеристики – графіки залежності сили струму від напруги (рис. 8.3.2). У результаті був виявлений прямо пропорційний зв'язок між силою струму та напругою: $I \sim U$. Однак, як видно з графіків (рис. 8.3.2), для кожного провідника коефіцієнт пропорційності різний. Це означає, що кожен провідник характеризується деякою мірою провідності струму і для різних провідників вона різна. Цю величину назвали електричним опором. При одній і тій же напрузі провідники з меншим опором будуть пропускати струм більшої сили.

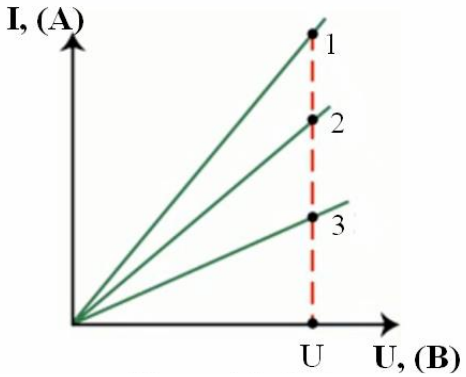


Рис. 7.6.2

Використовуючи експериментальні результати, у 1826 році Ом сформулював так званий закон Ома для ділянки кола: *сила струму на ділянці кола прямо пропорційна напрузі на цій ділянці і обернено пропорційний опору провідника*:

$$I = \frac{U}{R} \tag{7.6.2}$$

де R – електричний опір, $[R] = Ом$.

Опір провідника залежить від матеріалу провідника і його геометричних розмірів. Для однорідного циліндричного провідника він може бути розрахований за формулою:

$$R = \rho \frac{l}{S} \tag{7.6.3}$$

ρ – питомий опір, величина, що характеризує матеріал провідника, $[\rho] = Ом \cdot м$.

Опір металів залежить від температури. З великим ступенем точності можна вважати, що залежність опору металів від температури є лінійною:

$$R = R_0(1 + \alpha t) \tag{7.6.4}$$

R – опір за температури t, ^{0}C; R_0 – опір за температури 0, ^{0}C; α – температурний коефіцієнт опору.

При розгляді фізичної природи питомого електричного опору використовують поняття питомої електричної провідності (електропровідності) σ.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \tag{7.6.5}$$

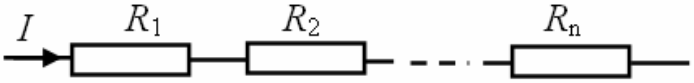


Рис. 7.6.3

Для послідовного з'єднання провідників (рис. 7.6.3) характерні наступні співвідношення:

$$I = I_1 = I_2 = ... = I_n;\ U = U_1 + U_2 + ... + U_n;\ R = R_1 + R_2 + ... + R_n.$$

У разі паралельного з'єднання провідників (рис. 7.6.4) характерні наступні співвідношення:

$$I = I_1 + I_2 + ... + I_n;\ U = U_1 = U_2 = ... = U_n;\ \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + ... + \frac{1}{R_n}.$$

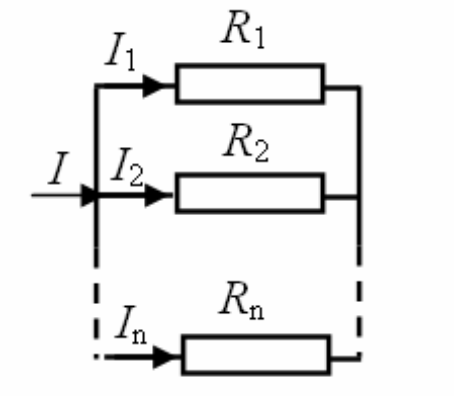


Рис. 7.6.4

Контрольні запитання до лекції №7.

1. Що розуміють під електричним зарядом?
2. назвіть основні властивості електричного заряду.
3. Який заряд називається точковим?
4. Сформулюйте та математично запишіть закон Кулона.
5. Що таке електричне поле?
6. Яка фізична величина є силовою характеристикою електричного поля?
7. Що розуміють під лініями напруженості електричного поля?
8. В чому полягає принцип суперпозиції електричних полів?
9. Яка фізична величина є енергетичною характеристикою електричного поля?
10. Яка поверхня називається еквіпотенціальною?
11. Що таке електрична ємність?
12. Що називається конденсатором?
13. Запишіть формулу визначення ємності плоского конденсатора.
14. Які співвідношення справедливі для ємності, заряду та напруги у випадку послідовного та паралельного з’єднання конденсаторів?
15. За якою формулою визначається енергія зарядженого конденсатора?
16. Що називають електричним струмом?
17. Назвіть основні умови існування електричного струму.
18. Назвіть основні дії струму та охарактеризуйте їх.
19. Сформулюйте та математично запишіть закон Ома для ділянки кола.
20. Які співвідношення справедливі для опору, струму та напруги у випадку послідовного та паралельного з’єднання провідників?

ЛЕКЦІЯ 8. РОБОТА І ПОТУЖНІСТЬ СТРУМУ. ЗАКОН ДЖОУЛЯ-ЛЕНЦА. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЯВИЩА

8.1. Робота і потужність струму. Закон Джоуля-Ленца.

При впорядкованому русі заряджених частинок в провіднику електричне поле виконує роботу. Її прийнято називати *роботою струму*. Розглянемо довільну ділянку кола постійного струму, до кінців якого прикладена напруга U. За час t через переріз провідника проходить заряд

$$q=It. \tag{8.1.1}$$

При цьому сили електростатичного поля, які діють на даній ділянці, виконують роботу:

$$A = Uq = UIt \tag{8.1.2}$$

Відомо, що

$$P = \frac{A}{t} \tag{8.1.3}$$

Підставимо (8.1.2) в (8.1.3). Одержимо:

$$P = IU \tag{8.1.4}$$

Ця потужність може витрачатися на виконання роботи даною ділянкою кола над зовнішніми тілами, на протікання хімічних реакцій, на нагрівання даної ділянки кола і т.п.

Якщо провідник нерухомий і в ньому не відбувається хімічних перетворень, то робота поля по переміщенню зарядів йде на зміну внутрішньої енергії провідника, тобто провідник нагрівається. При цьому виділяється кількість теплоти:

$$Q = A = IUt \tag{5}$$

За законом Ома $U = IR$. Зробивши заміну, одержуємо:

$$Q = I^2Rt \tag{6}$$

Цей вираз називається законом Джоуля-Ленца (Джоуль – англ. фізик, Ленц – російський): *кількість теплоти Q, що виділяється в провіднику при проходженні в ньому постійного струму, прямо пропорційна квадрату сили струму I, опору провідника R і часу проходження струму.*

8.2. Характеристики магнітного поля.

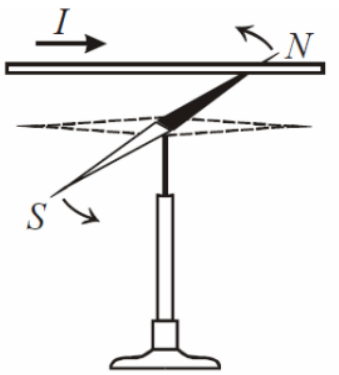


Рис. 8.2.1

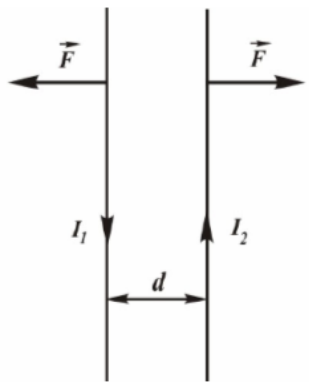


Рис. 8.2.2

Магнетизм – особлива форма взаємодії між електричними струмами, між електричними струмами та магнітами і між магнітами. У самому загальному вигляді магнетизм можна визначити як особливу форму матеріальної взаємодії, що виникає між рухомими електрично зарядженими частинками. Передача магнітної взаємодії, що реалізує зв'язок, який відбувається між просторово розділеними тілами, здійснюється магнітним полем. *Магнітне поле* – силове поле, яке утворюється навколо провідника, по якому протікає електричний струм. Воно пов'язане з рухомими зарядами. Магнітні поля існують в космічному просторі, вони впливають на рух заряджених частинок, що створюють космічне проміння.

В 1820 році датський фізик Ерстед виявив, що магнітна стрілка, яка розташована паралельно прямолінійному провіднику, при пропусканні через нього сталого струму I прагне розташуватися перпендикулярно провіднику (рис. 8.2.1). При зміні напряму струму

стрілка поверталася на 180°. Те ж саме відбувалося, коли стрілка переносилася вгору і розташовувалася над дротом.

У тому ж році Андре-Марі Ампер (французький фізик) встановив, що два провідники, які розташовані паралельно один одному, зазнають взаємного притягання при пропусканні через них струму в одному напрямі і відштовхуються, якщо струми мають протилежні напрями (рис. 8.2.2). Сила взаємодії провідників пропорційна величині струмів і обернено пропорційна відстані між ними:

$$F \sim \frac{I_1 I_2}{d} \qquad (8.2.1)$$

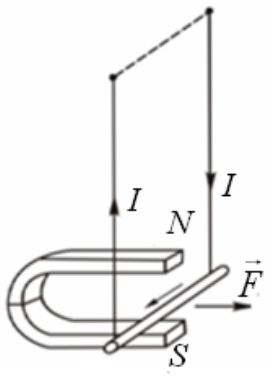


Рис. 8.2.3

Якщо провідник зі струмом помістити між полюсами підковоподібного магніту, то він або втягуватиметься, або виштовхуватиметься з нього залежно від напряму струму (рис. 8.2.3). Сила дії з боку магнітного поля пропорційна силі струму і довжині провідника:

$$F \sim Il \qquad (8.2.2)$$

Таким чином, експерименти показали, що навколо провідників зі струмом і сталих магнітів існує *магнітне поле*, яке виявляється через силову дію на інші провідники зі струмом, сталі магніти, електричні заряди, що рухаються. На відміну від електричного поля магнітне поле не діє на заряд, що знаходиться в стані спокою.

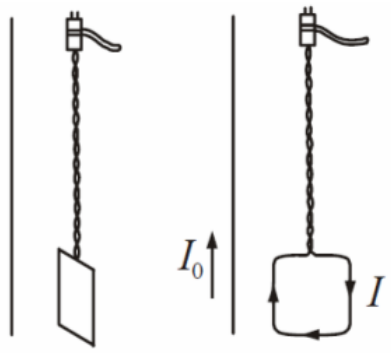
Саме Ампер встановив *властивості магнітного поля*.

1) Магнітне поле створюється рухомими електричними зарядами. Іншими словами, магнітне поле утворюється навколо провідника, по якому протікає електричний струм.

2) Магнітне поле визначається по дії на інший рухомий електричний заряд (інший електричний струм). Наявність магнітного поля ми можемо визначити по дії на стрілку компаса, на т.зв. магнітну стрілку.

3) Магнітне поле здійснює силову дію. Тому кажуть, що магнітне поле матеріальне.

Магнітне поле досліджується за допомогою рамки, по якій протікає струм. Розташуємо дріт на відстані, значно більшій за розміри рамки. Якщо пропускати струм через рамку і дріт, рамка повертається і розташовується так, що дріт опиняється в площині рамки (рис. 8.2.4). Як відомо з курсу механіки, тіло повертається під дією моменту сил. Якщо брати різні за площею рамки з різними струмами, то моменти сил, що діють на ці рамки в даній точці поля, будуть різними. Проте відношення максимального моменту сил до добутку сили струму в рамці на її площу буде для даної точки поля одним і тим же. Це відношення приймають як величину, що характеризує магнітне поле, і називають *індукцією магнітного поля в даній точці*.



а б

Рис. 8.2.4

Магнітна індукція $\left(\vec{B}\right)$ *– це векторна фізична величина, яка є силовою характеристикою магнітного поля і чисельно дорівнює відношенню максимального обертаючого моменту* M_{max}*, що діє на контур зі струмом в однорідному магнітному полі, до добутку сили струму* I *в контурі на його площу* S:

$$B = \frac{M_{\max}}{IS} \qquad (8.2.3)$$

З дослідів Ампера випливає, що на провідник зі струмом, який розміщений в магнітному полі, діє сила, яка пропорційна струму в провіднику і довжині провідника. Величина сили також залежить від орієнтації провідника в магнітному полі. Виявляється,

що відношення максимальної сили, що діє на провідник зі струмом, до добутку сили струму на довжину провідника, для даної точки поля залишається сталим. Тому можна дати інше визначення магнітній індукції.

Магнітна індукція $\left(\vec{B}\right)$ *– це векторна фізична величина, яка є силовою характеристикою магнітного поля і чисельно дорівнює відношенню максимального значення сили , що діє на провідник зі струмом, до добутку сили струму I в ньому на довжину провідника l*:

$$B = \frac{F_{\max}}{Il} \qquad (8.2.4)$$

Індукція магнітного поля є однією з найважливіших кількісних характеристик магнітного поля. Одиниця вимірювання магнітної індукції названа на честь сербського вченого Ніколи Тесли, тобто індукція вимірюється в теслах [B]=Тл (тесла).

Окрім вектора магнітної індукції для характеристики магнітного поля використовують допоміжну величину $\vec{H}$, яку називають напруженістю магнітного поля. Магнітна індукція і напруженість зв'язані між собою співвідношенням:

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H} \qquad (5)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала; μ − відносна магнітна проникність середовища; H – напруженість магнітного поля.

Магнітна проникність середовища μ − це фізична величина, яка показує, у скільки разів магнітна індукція поля в даному середовищі відрізняється від магнітної індукції поля у вакуумі. Для вакууму μ=1.

Напруженість магнітного поля $\vec{H}$ – це векторна величина, яка є кількісною характеристикою магнітного поля. Напруженість магнітного поля визначає той внесок в магнітну індукцію, який дають зовнішні джерела поля. [H]=А/м.

8.3. Графічне зображення магнітних полів.

Графічно магнітні поля можна зображати за допомогою ліній магнітної індукції (силових ліній магнітного поля). Лінія, в будь-якій точці якої вектор магнітної індукції $\vec{B}$ спрямований по дотичній до неї, називається *лінією магнітної індукції* (*силовою лінією магнітного поля*).

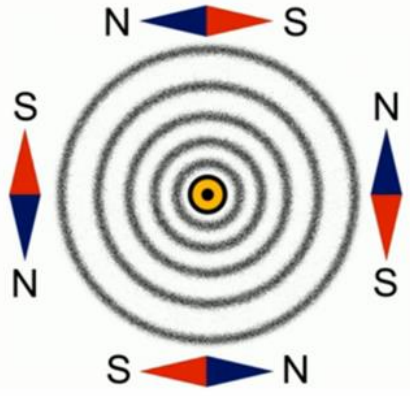


Рис. 8.3.1

Візьмемо провідник, який розташовується перпендикулярно до малюнку. Крапка в центрі провідника означає те, що електричний струм напрямлений на спостерігача (рис. 8.3.1). Якщо навколо цього провідника на площині, яку ми бачимо, розсипати залізні ошурки, то вони будуть розташовуватися строго по колах. Перебуваючи в магнітному полі провідника, ці маленькі залізні ошурки намагнітяться і їх можна вважати маленькими магнітними стрілками. Розміщуючись вздовж ліній, ці стрілки нам і покажуть форму магнітного поля. Отже, магнітна лінія – уявна лінія, вздовж якої шикувалися б осі магнітних стрілок.

Магнітна лінія може бути вигнутою. І в цьому випадку її напрям показують магнітні стрілки, зокрема, північний полюс магнітної стрілки, як показано на рис. 8.3.2.

Силові лінії креслять так, щоб їх густина була пропорційна модулю вектора $\vec{B}$ в даному місці.

Лінії індукції магнітного поля в жодній точці поля не обриваються, тобто вони завжди безперервні. Вони не мають ні початку, ні кінця. Цим силові лінії магнітного поля відрізняються від силових ліній електростатичного поля, які завжди починаються і

закінчуються на електричних зарядах або йдуть в нескінченність. Векторне поле, що має безперервні силові лінії, називається *вихровим полем*. Магнітне поле – це вихрове поле.

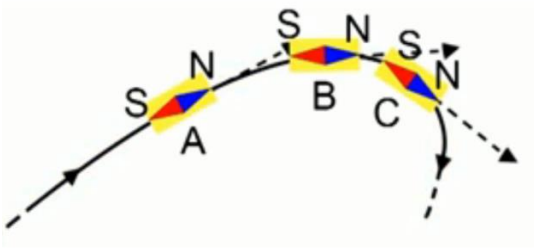
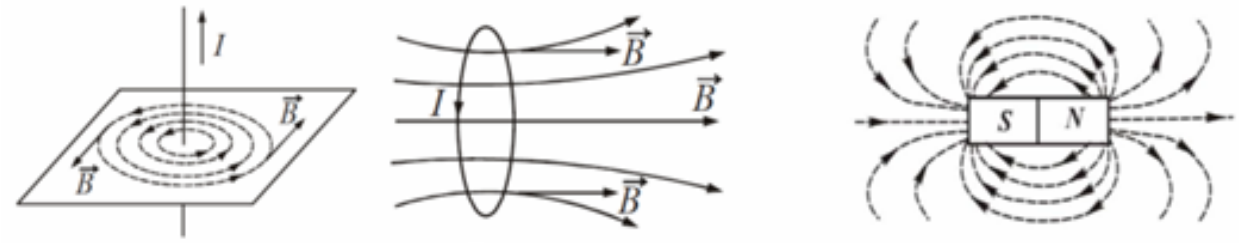


Рис. 8.3.2

Лінії індукції прямого провідника із струмом є колами, що лежать в площині, перпендикулярній до провідника. Центри кіл знаходяться на осі провідника (рис. 8.3.3, а) Напрям ліній індукції магнітного поля визначається за *правилом буравчика*: напрям ліній індукції співпадає з напрямом ручки буравчика, який обертають вздовж напрямку струму.

Лінії індукції кругового струму представлені на рис. 8.3.3, б., а лінії індукції поля, створюваного постійним магнітом – на рис. 8.3.3, в



а б в

Рис. 8.3.3

Якщо у всіх точках деякої частини простору вектор магнітної індукції $\vec{B}$ не змінює свого напряму і чисельного значення, то магнітне поле в цій частині простору називається однорідним. У протилежному випадку магнітне поле є неоднорідним.

8.4. Виявлення магнітного поля за його дією на електричний струм. Правило лівої руки. Сила Лоренца.

Як було сказано вище, в свій час Ампер встановив, що коли пропускати по двох паралельних провідниках струм, то в залежності від напрямків цих струмів, провідники або притягуються, або відштовхуються. Таким чином, ми спостерігаємо силову дію магнітного поля на електричний струм. Отже, можна сказати наступне: магнітне поле створюється електричним струмом і виявляється за його дією на інший електричний струм. Сила, що діє на провідник зі струмом у магнітному полі *називається силою Ампера*. Визначається ця сила за формулою:

$$F_A = BIl\sin\alpha \qquad (8.4.1)$$

де l – довжина активної частини провідника; I – сила струму в ньому; B – модуль вектора магнітної індукції; α – кут між напрямом струму і вектором магнітної індукції. Напрям сили Ампера визначається правилом лівої руки: *якщо долоню лівої руки розташувати так, щоб витягнуті пальці збігалися з напрямом струму, а силові лінії магнітного поля входили в долоню, то відставлений великий палець вкаже напрям сили, що діє на провідник* (рис. 8.4.1).

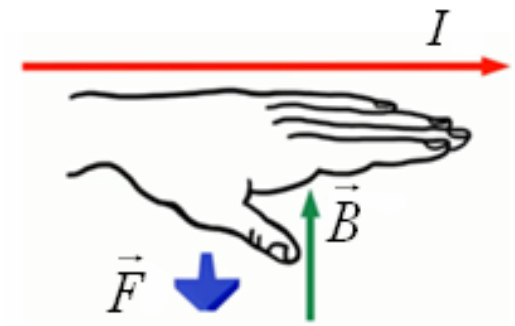


Рис. 8.4.1

Оскільки електричний струм – впорядкований рух заряджених частинок, тому магнітне поле діє не тільки на провідники зі струмом, але і на окремі заряджені частинки. Сила $\vec{F}_л$, що діє на електричний заряд, який

рухається у магнітному полі, називається *силою Лоренца* (нідерландський фізик). Сила Лоренца розраховується за формулою:

$$F_л = qB\vartheta \sin\alpha \qquad (8.4.1)$$

де q – заряд частинки; B – індукція магнітного поля, в якому рухається заряд; ϑ – швидкість заряду; α – кут між векторами $\vec{\vartheta}$ і $\vec{B}$.

Напрям сили Лоренцо визначається також за правилом лівої руки: *якщо долоню лівої руки розмістити так, щоб в неї входив вектор* $\vec{B}$, *а чотири витягнуті пальці спрямовувати вздовж вектора швидкості* $\vec{v}$ *руху позитивних зарядів, то відігнутий на* 90^0 *великий палець покаже напрямок сили, що діє на позитивний заряд*. На негативний заряд сила діє в протилежному напрямку.

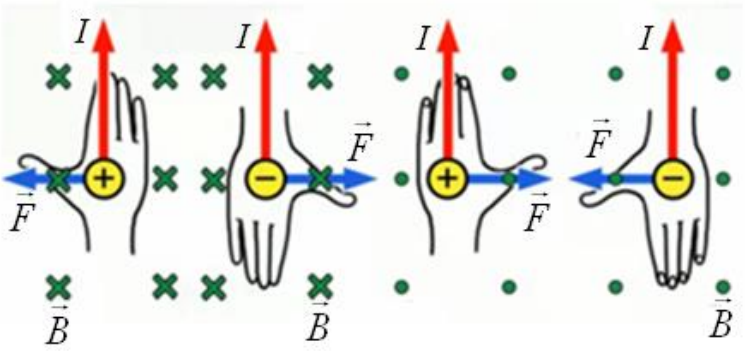


Рис. 8.4.2

На рис. 8.4.2 показані різні випадки використання правила лівої руки. Хрестики означають, що магнітне поле напрямлене від нас, а крапки – до нас.

Сила Лоренца спрямована завжди перпендикулярно швидкості руху зарядженої частинки і надає їй доцентрове прискорення. Не змінюючи модуля швидкості, а лише змінюючи її напрям, сила Лоренца не виконує роботи і кінетична енергія зарядженої частинки за умов руху в магнітному полі не змінюється.

Контрольні запитання до лекції №8.

1. Сформулюйте та математично запишіть закон Джоуля-Ленца.
2. Що називається магнітним полем?
3. Сформулюйте основні властивості магнітного поля.
4. Що називається магнітною індукцією?
5. Як пов’язані між собою напруженість та індукція магнітного поля?
6. Що називається лінією магнітної індукції?
7. Яке поле називається вихровим?
8. Сформулюйте правило буравчика?
9. Як визначається напрям сили Ампера?
10. Як визначається напрям сили Лоренца?

ЛЕКЦІЯ 9. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ

9.1. Явище електромагнітної індукції. Правило Ленца.

На початку XIX ст. після дослідів датського вченого Ерстеда стало ясно, що електричний струм створює навколо себе магнітне поле. Тому постало питання про те, чи не можна отримати електричний струм за рахунок магнітного поля? Якщо електричний струм створює магнітне поле, то, напевно, і магнітне поле повинне створювати електричний струм. У першій половині XIX століття вчені звернулися саме до таких дослідів: стали шукати можливість створення електричного струму за рахунок магнітного поля.

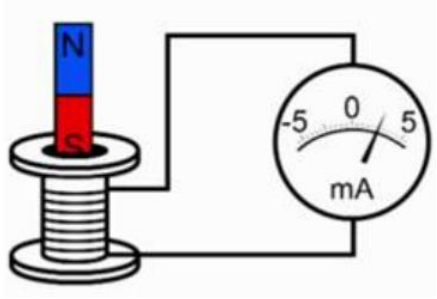


Рис.9.1.1

Вперше отримати електричний струм за рахунок магнітного поля вдалося англійському фізику Майклу Фарадею. Фарадей використовував у своїх дослідах котушку з великим числом витків. Котушка накоротко була приєднана до вимірювального приладу, міліамперметру (мА) (рис. 9.1.1). Уздовж котушки Фарадей переміщував постійний магніт – відносно котушки магніт рухався вгору і вниз. Вчений звернув увагу на той факт, що стрілка міліамперметра відхиляється від свого нульового значення, тобто показує, що в колі існує електричний струм тільки тоді, коли магніт рухається. Варто тільки магніту зупинитися, стрілка повертається в нульове положення, тобто електричний струм в колі не протікає.

Напрям струму залежить від того, яким полюсом був спрямований магніт до котушки і від напряму його руху. Той же результат виходив, якщо магніт залишався нерухомим, а котушку надягали на магніт або знімали з нього. Відкрите Фарадеєм явище було названо явищем електромагнітної індукції.

Електромагнітної індукцією називається явище виникнення електрорушійної сили (ЕРС) в провідному контурі при будь-якій зміні магнітного потоку, що пронизує цей контур.

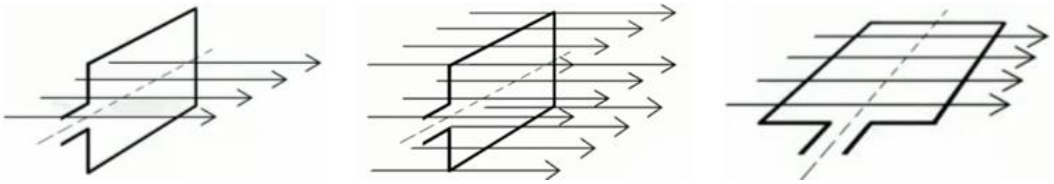
ЕРС, що виникає, називається електрорушійною силою електромагнітної індукції E_i. Якщо провідник замкнений, то виникає струм, який називається *індукційним.*

Подальші експерименти показали, що ЕРС електромагнітної індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур:

$$E_i = -\frac{d\Phi}{dt} \qquad (9.1.1)$$

При цьому неістотно, чим викликана зміна магнітного потоку. Це може бути деформація або переміщення контуру в зовнішньому полі, або зміна магнітного поля в часі.

У формулі (9.1.1) Φ – магнітний потік, $[\Phi]$=Вб (вебер). Магнітний потік можна порівняти з потоком рідини, що протікає через обмежену поверхню. Якщо взяти трубу, і в цій трубі протікає рідина, то, відповідно, через площу поперечного перерізу труби буде протікати певний потік води. Магнітний потік за такою аналогією характеризує, яка кількість магнітних ліній буде проходити через обмежений контур. Так на рис. 9.1.2 (а і б) показано, що через одну і ту саму площу проходить різна кількість ліній магнітної індукції, а отже через неї буде проходити і різний магнітний потік. Чим більша кількість ліній – тим більший магнітний потік. На рис. 9.1.2 (в) контур розміщується таким чином, що через нього не проходять магнітні лінії. У цьому випадку можна сказати, що магнітний потік відсутній, тобто немає ліній, які пронизували б поверхню цього контуру.



а б в

Рис. 9.1.2

Можна сказати про те, що магнітний потік – це друга дуже важлива характеристика магнітного поля. Якщо магнітну індукцію називають силовою характеристикою магнітного поля, то магнітний потік – це енергетична характеристика магнітного поля.

Для магнітного потоку справедливі наступні характеристики:

1. магнітний потік пропорційний магнітної індукції ($\Phi \sim B$); 2. магнітний потік прямо пропорційний площі поверхні контуру, через який проходять лінії магнітної індукції ($\Phi \sim S$); 3. величина магнітного потоку залежить від кута розташування контуру $(\Phi = \Phi(\alpha))$.

В загальному випадку Φ визначається за формулою:

$$\Phi = BS\cos\alpha \qquad (9.1.2)$$

Магнітний потік Φ через замкнутий контур – це скалярна фізична величина, що чисельно дорівнює добутку модуля магнітної індукції B на площу поверхні S та на косинус кута α між вектором магнітної індукції $\vec{B}$ і нормаллю до поверхні $\vec{n}$ (рис. 9.1.3).

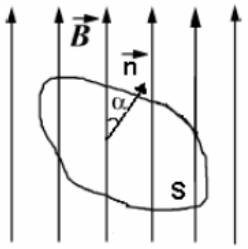


Рис. 9.1.3

Під дією магнітного потоку створюється електричне поле в замкнутому провіднику, яке створює електричний струм, який називається індукційним.

Вираз (9.1.1) називається законом Фарадея (або законом електромагнітної індукції) для електромагнітної індукції. Знак „–” введений у формулу відповідно до правила Ленца. Правило Ленца:

Індукційний струм має такий напрям, що його магнітне поле протидіє зміні магнітного потоку, що викликав цей індукційний струм.

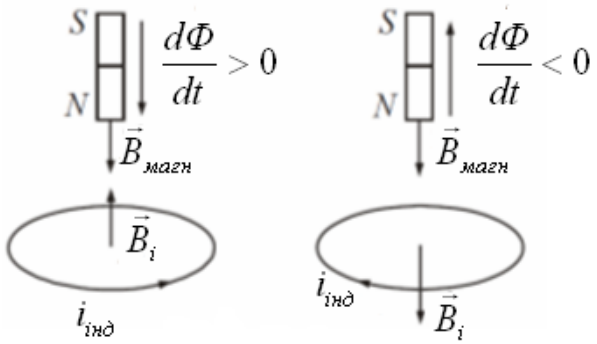


Рис. 9.1.4

Лінії індукції магнітного поля виходять з північного полюсу N і заходять в південний полюс S. При наближенні смугового магніту до замкненого контуру (рис. 9.1.4) в ньому наводиться індукційний струм, який своєю магнітною дією перешкоджає наближенню магніту і зростанню магнітного потоку, що пронизує контур. При видаленні магніту (рис. 9.1.4) від контуру в ньому наводиться індукційний струм протилежного напряму, який перешкоджає видаленню магніту і зменшенню магнітного потоку, що пронизує контур.

Сила індукційного струму прямо пропорційна швидкості зміни магнітного поля:

$$I_i \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \qquad (9.1.3)$$

Виходячи з цієї залежності, можна зробити висновок, що індукційний струм може бути створений і досить слабким магнітом, але при цьому його швидкість руху повинна бути дуже великою.

Якщо замкнений контур складається з N послідовно сполучених витків (наприклад, соленоїд), то закон електромагнітної індукції записується таким чином:

$$E_i = -N\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(N\Phi)}{dt}. \qquad (9.3.4)$$

9.2. Самоіндукція. Індуктивність контуру. Енергія магнітного поля.

Струм, що змінюється по величині, завжди створює змінне магнітне поле, яке в свою чергу, завжди індукує ЕРС. При будь-якій зміні струму в котушці (або взагалі в провіднику) в ній самій індукується ЕРС самоіндукції.

Самоіндукція − це явище виникнення вихрового електричного поля у провіднику, по якому тече змінний струм. Самоіндукція є окремим випадком електромагнітної індукції. При зміні струму в контурі змінюється потік магнітної індукції через поверхню, обмежену цим контуром. В результаті цього в ньому збуджується ЕРС самоіндукції. При збільшенні в колі сили струму ЕРС самоіндукції перешкоджає його зростанню, а при зменшенні струму – його зменшенню. Можна сказати, що самоіндукція подібна явищу інерції в механіці.

Електрорушійну силу, що виникає в будь-якому замкнутому контурі при зміні його власного поля, називається ЕРС (E_{is}) самоіндукції. E_{is} пропорційна швидкості зміни струму в провіднику $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ і обчислюють за формулою:

$$E_{is} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} \qquad (9.2.1)$$

де L – величина, що характеризує контур (наприклад, котушку) і навколишнє його середовище (сердечник).

Індуктивність – це скалярна величина, що характеризує електромагнітні властивості провідника і дорівнює відношенню загального магнітного потоку через поверхню, обмежену провідником, до сили струму в ньому:

$$L = \frac{\Phi}{I} \qquad (9.2.2)$$

Індуктивність вимірюється в генрі, $[L] = Гн.$ Дана одиниця названа на честь американського вченого Джозефа Генрі.

Для створення електричного струму і, отже, його магнітного поля необхідно виконати роботу проти сил вихрового електричного поля. Ця робота (відповідно до закону збереження енергії) дорівнює енергії електричного струму або енергії магнітного поля струму і обчислюється за формулою:

$$W = \frac{LI^2}{2} \qquad (9.2.3)$$

Енергія магнітного поля дорівнює роботі, яка затрачається струмом на створення цього поля.

9.3. Магнітне поле Землі.

Магнітне поле Землі – силове поле, виникнення якого зумовлене джерелами, що знаходяться в земній кулі та навколоземному просторі (магнітосфері та іоносфері). Середня напруженість поля на поверхні Землі складає близько 50 мкТл.

Земля – це величезний магніт, навколо якого створюється магнітне поле. Магнітні полюси Землі не співпадають з істинними географічними полюсами – північним та південним. Силові лінії, які йдуть від одного магнітного полюса до іншого називаються *магнітними меридіанами*. Між магнітним та географічним меридіаном утворюється деякий кут (біля 11,5°), який називається *магнітним відхиленням*. Тому намагнічена

стрілка компасу точно вказує направлення магнітних меридіанів, а направлення на північний географічний полюс – лише приблизно (рис. 9.3.1).

Вільно підвішена магнітна стрілка розташовується горизонтально лише на лінії магнітного екватора, який не збігається з географічним. Якщо рухатися на північ від магнітного екватора, то північний кінець стрілки поступово опускатиметься. Кут, утворений магнітною стрілкою і горизонтальною площиною, називається *магнітним нахилом*. На Північному магнітному полюсі (77° п.ш. і 102° з.д.) вільно підвішена магнітна стрілка встановиться вертикально північним кінцем вниз, а на Південному магнітному полюсі (65° п.ш. и 99° с.д.) її південний кінець опуститься вниз. Таким чином, магнітна стрілка показує напрямок силових ліній магнітного поля над земною поверхнею.

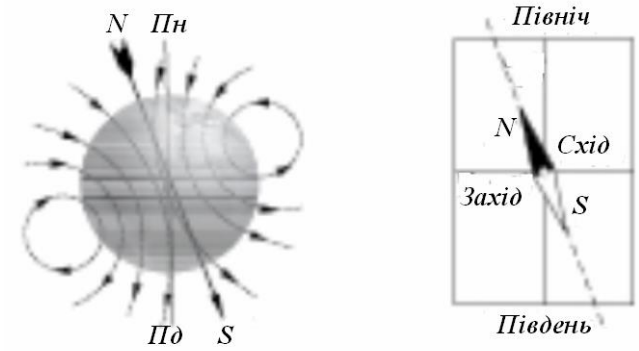


Рис. 9.3.1

Вважається, що постійне магнітне поле наша планета генерує сама. Воно створюється завдяки системі електричних струмів, що виникають при обертанні Землі і переміщенні рідкої речовини в її зовнішньому ядрі. Положення магнітних полюсів і розподіл магнітного поля по земній поверхні з часом змінюються. Магнітне поле Землі тягнеться до висоти біля 100 тис. км. Воно відхиляє або захоплює частинки сонячного вітру, шкідливі для всіх живих організмів. Ці заряджені частинки утворюють *радіаційний пояс Землі*, а вся область навколоземного простору, в якій вони знаходяться, називається *магнітосферою*.

Сонце надсилає до Землі величезний потік енергії, що складається з електромагнітного випромінювання (видимого світла, інфрачервоного і радіовипромінювання); ультрафіолетового і рентгенівського випромінювань; сонячних космічних променів, виникаючих тільки під час дуже сильних спалахів та сонячного вітру – постійного потоку плазми, створеного головним чином протонами (іони водню). Електромагнітне випромінювання Сонця приходить до Землі через 8 хвилин, а потоки частинок рухаються зі швидкістю біля 1000 км/с та затримуються на дві-три доби. Основною причиною збурень сонячного вітру, що істотно впливають на земні процеси, є грандіозні викиди речовини з корони Сонця. При русі до Землі вони перетворюються на магнітні хмари і приводять до сильних, інколи екстремальних збурень на Землі. Особливо сильні збурення магнітного поля Землі – *магнітні бурі* – порушують радіозв'язок, викликають інтенсивні полярні сяйва.

Контрольні запитання до лекції №9.

1. Що називається електромагнітної індукцією?
2. Який струм називається індукційним?
3. Яка фізична величина є енергетичною характеристикою магнітного поля?
4. Назвіть основні характеристики магнітного поля.
5. Як звучить правило Ленца?
6. Що називається магнітним потоком або потокозчепленням?
7. Що таке самоіндукція?
8. Що таке індуктивність?
9. Що називається магнітним відхиленням?
10. Що таке магнітний нахил?

ЛЕКЦІЯ 10. ХВИЛЬОВА ТА ГЕОМЕТРИЧНА ОПТИКА

10.1. Історія розвитку уявлень про природу світла.

Оптика – розділ фізики, який вивчає світлові явища і закони, встановлені для них, а також взаємодія світла з речовиною, природу світла.

Перші відомості про світло з'явилися 2,5 тисячі років тому. Піфагор був одним з перших учених, хто дав наукову гіпотезу щодо природи світла. Він перший не тільки здогадався, але і довів, що світло поширюється прямолінійно. Піфагор, а потім і інші геометри, аж до Евкліда, використовували світлові явища відбиття і заломлення для побудови основ геометрії. Недарма один з розділів оптики так і називається – геометрична оптика. Піфагор вважав, що світло – це потік частинок, які випромінюють предмети, проникаючи в око людини, вони приносять інформацію про те, що ж нас оточує.

У XVII столітті прихильником цієї теорії став Ісаак Ньютон. Він пояснював багато світлових явищ, ґрунтуючись на тому, що світло – це потік спеціальних частинок (корпускул). Тому теорія Ньютона стала називатися *корпускулярною теорією світла*. Доказом даної теорії приводились наступні факти: 1) прямолінійне поширення світла; 2) закон відбивання світла; 3) утворення тіні від предмета.

У цей же час з'явилася інша теорія – *хвильова теорія світла*. Прихильником цієї теорії був Християн Гюйгенс. Він намагався пояснити ті ж явища, що і Ньютон, тільки з тієї позиції, що світло – це хвиля. Світлові хвилі Гюйгенс розглядав як пружні хвилі високої частоти, що поширюються в особливому пружному й густому середовищі – ефірі, який заповнює всі матеріальні тіла, проміжки між ними й міжпланетні простори. Він строго математично описав явище відбиття й заломлення хвиль, причому з його міркувань випливало, що швидкість світла в густішому середовищі повинна бути менше, ніж у повітрі.

У 1801 р. Юнг на основі хвильових уявлень про світло доволі просто й наочно роз'яснив інтерференцію світла й розвинув у такий спосіб хвильову теорію світла. Френзель у 1818 р. незалежно від Юнга розвинув теорію дифракції й інтерференції світла, показавши при цьому, що інтерференція є прямим наслідком хвильової природи світла.

Протягом понад сто років корпускулярна й хвильова гіпотези про природу світла існували паралельно. Жодна з них не могла здобути вирішальної перемоги, адже кожна з теорій пояснювала ряд властивостей світла, але кожна мала певні недоліки, так як не могла пояснити деяких понять і явищ. Так корпускулярна теорія не могла пояснити явищ інтерференції і дифракції світла, а хвильова не могла пояснити, як світло поширюється у вакуумі, оскільки поперечна механічна хвиля не може поширюватись при відсутності середовища.

Суперечність у хвильовій теорії спростував Д. Максвелл (англ. фізик). Згідно створеної ним теорії електромагнітних хвиль і визначення їх швидкості, він висунув гіпотезу, що *світло – це теж електромагнітна хвиля*. Таку гіпотезу він висунув після того, як з'ясував, що електромагнітне поле поширюється зі швидкістю $3 \cdot 10^8$ м/с. Адже до цього часу вже були проведені експериментальні результати по визначенню швидкості світа – датським ученим Ремером та французьким Іполитом Фізо, які довели, що швидкість поширення світла дорівнює приблизно $3 \cdot 10^8$ м/с. Пізніше ця гіпотеза була повністю підтверджена багатьма дослідами. Так виникла *електромагнітна теорія світла*.

10.2. Геометрична оптика. Закони геометричної оптики.

Геометрична оптика – це розділ оптики, в якому розглядають питання поширення світла в різних оптичних системах (лінзах, призмах і т.д.) без розгляду питання про природу світла.

Одним з основних понять оптики і, зокрема, геометричної оптики, є поняття променя. *Під променем розуміють лінію*, уздовж якої поширюється енергія електромагнітної хвилі.

Варто розуміти, що світловий промінь – це пучок світла, товщина якого набагато менша за відстань, на яку він поширюється. Таке визначення близьке, наприклад, до визначення матеріальної точки, яке дається в кінематиці.

Основу геометричної оптики утворюють чотири закони: 1) *закон прямолінійного поширення світла*; 2) *закон незалежності світлових променів*; 3) *закон відбивання світла*; 4) *закон заломлення світла*.

Закон прямолінійного поширення світла: *в однорідному прозорому середовищі світло поширюється прямолінійно.* Цей закон є наближеним: при проходженні світла через дуже малі отвори спостерігаються відхилення від прямолінійності.

За теоремою Ферма: *світло поширюється по такому напрямку, час поширення по якому буде мінімальним*.

Закон незалежності світлових променів: *світлові промені, поширюючись у просторі, при перетині не впливають один на одного.* Перетини променів не заважають кожному з них поширюватися незалежно один від одного. Цей закон справедливий при не дуже великій інтенсивності світла. При інтенсивності, що досягається за допомогою лазерів, незалежність світлових променів перестає дотримуватися.

При падінні променів світла на межу розділу двох середовищ відбуваються явища відбивання і заломлення світлових променів.

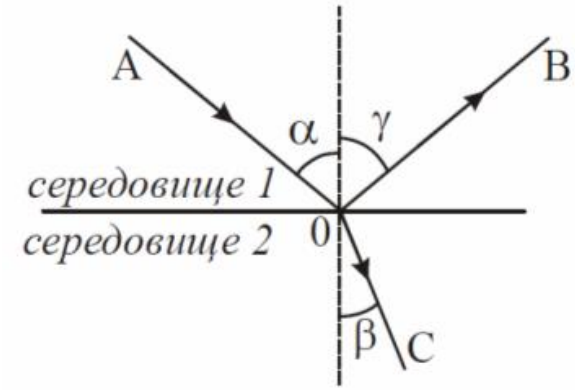


Рис. 10.2.1

Кутом падіння називають кут α між падаючим променем А світла і перпендикуляром до межі розділу двох середовищ, проведеним у точку падіння 0 (рис. 10.2.1).

Кутом відбивання називають кут γ між відбитим променем В світла і перпендикуляром до відбивної поверхні, проведеним у точку падіння 0 (рис. 10.2.1).

Кутом заломлення називають кут β між променем С, що пройшов через межу розділу двох середовищ, і перпендикуляром до межі, проведеним у точку заломлення 0 (рис. 10.2.1).

Закон відбивання світла: *1) падаючий промінь А, відбитий промінь В і перпендикуляр до відбивної поверхні, проведений у точку падіння 0 лежать в одній площині ; 2) кут падіння* α *дорівнює куту відбивання* γ (рис. 10.2.1).

Закон заломлення світла (закон Снелліуса, нідерланд. фізик): 1) *заломлений промінь* С, *падаючий промінь* А *і перпендикуляр до поверхні розділу середовищ, проведений у точку падіння* 0, *лежать в одній площині* (рис. 10.2.1);

2) *відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення є величиною сталою для двох даних середовищ:*

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n_{21} \qquad (10.2.1)$$

Величина n_{21} називається *відносним показником заломлення* середовища 2 відносно середовища 1. Показник заломлення називається відносним, оскільки вимірювання проводяться відносно двох середовищ. Відносний показник заломлення n_{21} дорівнює відношенню абсолютних показників заломлення n_2 і n_1 цих середовищ:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} \qquad (10.2.2)$$

Абсолютним показником заломлення середовища називається показник заломлення середовища відносно вакууму. Він дорівнює відношенню швидкості світла у вакуумі до швидкості світла в даному середовищі:

$$n = \frac{c}{\vartheta} \qquad (10.2.3)$$

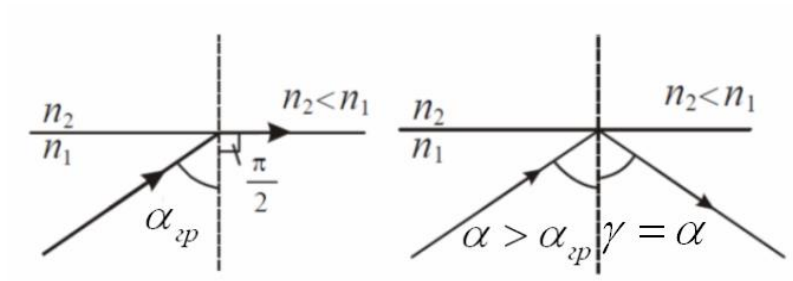
де c=3·10^8 м/с – швидкість світла у вакуумі, ϑ – швидкість світла у даному середовищі.

Якщо $n_2 > n_1$, то середовище 2 називається оптично густішим в порівнянні з середовищем 1. Якщо $n_2 < n_1$, то середовище 2 називається оптично менш густішим в порівнянні з середовищем 1.

Наслідки з закону Снелліуса:

1. Під час переходу променя світла з середовища оптично менш густішого в оптично більш густіше ($n_2 > n_1$) кут заломлення β менше кута падіння α. Заломлений промінь С в точці падіння променя відхиляється у бік перпендикуляра до межі розділу двох середовищ (рис. 10.2.1).

2. Під час переходу променя світла з середовища оптично більш густішого в оптично менш густіше середовище ($n_2 < n_1$) кут заломлення β більше кута падіння α. Заломлений промінь С в точці падіння променя відхиляється від перпендикуляра до межі розділу двох середовищ.



а б

Рис. 10.2.2

Під час збільшення кута падіння α кут заломлення β зростає, залишаючись весь час більше кута α. Нарешті, при деякому куті падіння значення кута заломлення наблизиться до 90° і заломлений промінь піде майже по межі розділу середовищ (рис. 10.2.2, а). Кут падіння $\alpha_{гр}$, відповідає куту заломлення $\beta = 90^0$ і називається *граничним кутом повного відбивання*. Він визначається з умови:

$$\sin \alpha_{гр} = n_{21} \qquad (10.2.4)$$

Якщо $\alpha > \alpha_{гр}$, то відбувається *повне внутрішнє відбивання.*

Таким чином під час переходу променя світла з середовища оптично більш густішого в оптично менш густіше середовище завжди існує граничний кут падіння при якому заломлений промінь буде поширюватись вздовж межі розділу двох середовищ. При кутах падіння більших граничного відбувається повне внутрішнє відбивання (рис. 10.2.2, б).

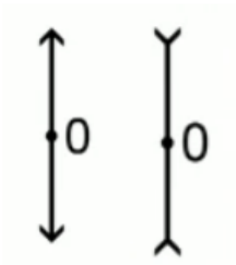
10.3. Лінзи. Побудова зображень, що дає тонка лінза.

Для отримання різного роду зображень в оптичних приладах широко використовують лінзи. *Лінзою називають оптично прозоре тіло, що обмежене двома гладкими випуклими або вгнутими поверхнями (одна з них може бути плоскою)*.

Найчастіше поверхні лінз роблять сферичними, а саму лінзу виготовляють із спеціальних сортів скла, наприклад, флінтгласу, або інших речовин з відповідними показниками заломлення.

Якщо відстань між обмежуючими поверхнями в центрі лінзи значно менша за радіуси їх кривизни*, то така лінза називається тонкою*. Лінза називається *збиральною*,

якщо вона є товстіша до середини, і *розсіювальною* – коли тонша до середини. Збиральна лінза на схемах позначається так, як показано на рис. 10.3.1, а, а розсіювальна – 10.3.1, б.



а б

Рис. 10.3.1

Розрізняють наступні типи лінз: 1) двояковипукла; 2) двояковвігнута; 3) плосковипукла; 4) плосковвігнута; 5) випукло-вігнута; 6) вгнуто-випукла. Їх схематичне зображення показано на рис. 10.3.2.

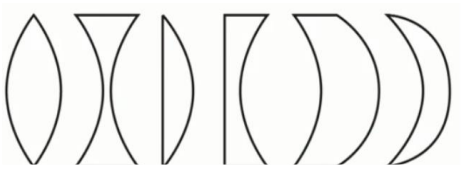


Рис. 10.3.2

Головна оптична вісь – це лінія, яка проходить через лінзу перпендикулярно до її площини. Вона проходить через центри сфер, які обмежують поверхню лінзи (O_1 і O_2, рис. 10.3.3). Точка О на рис. 10.3.3 – оптичний центр лінзи – точка перетину головної оптичної осі з лінзою.

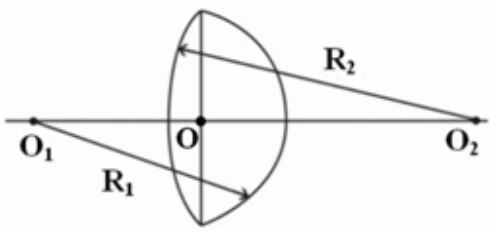
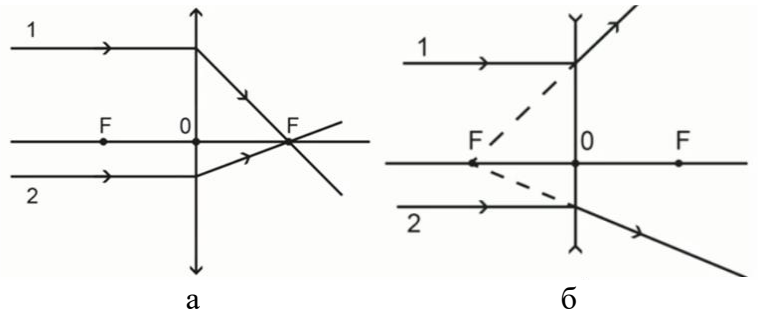


Рис. 10.3.3

Вісь, яка проходить через оптичний центр лінзи, але не перпендикулярно до її площини називається *побічною оптичною віссю*.

Головний фокус лінзи (F) – точка, розташована на головній оптичній осі, в якій перетинаються або промені, або їх продовження.

Якщо на збиральну лінзу направити пучок променів, паралельних до її головної



а б

Рис. 10.3.4

оптичної осі, то після заломлення в лінзі вони зберуться в головному фокусі з другого боку лінзи (рис. 10.3.4, а).

Якщо промені падають на розсіюють лінзу, то їх продовження перетинаються в уявному фокусі F (рис. 10.3.4, б).

Кожна лінза має два головні фокуси, які розташовані симетрично відносно її оптичного центра О. Відстань між головним фокусом лінзи та її оптичним центром називають *фокусною відстанню* F лінзи. Величина, яка обернена до фокусної відстані F лінзи *називається оптичною силою* D *лінзи.* Одиницею вимірювання оптичної сили в системі СІ є *діоптрія (дптр)*.

$$D = \frac{1}{F} \tag{10.3.1}$$

Для тонких лінз фокусна відстань F, оптична сила D, відстані від лінзи до предмета d і до зображення f пов'язані співвідношенням, яке називають формулою тонкої лінзи:

$$\frac{1}{d} \pm \frac{1}{f} = \pm \frac{1}{F} = \pm D \tag{10.3.2}$$

Правила розстановки знаків:

Якщо лінза збиральна, то її фокус дійсний і перед $\frac{1}{F}$ ставиться знак „+”, якщо лінза розсіювальна, то ставиться знак „-”. Перед відношенням $\frac{1}{f}$ ставиться знак „-”, якщо зображення уявне, і „+”, якщо дійсне.

Перед відношенням $\frac{1}{d}$ ставиться знак „-” у випадку точки, що світиться і є уявною (тобто на лінзу падає розсіяний пучок світла) і „+” у випадку точки, що світиться і є дійсною.

Дві площини, паралельні головній площині з обох боків лінзи, які проходять через фокуси, називають *фокальними площинами*. Точки перетину побічних осей з ними називають *побічними фокусами*.

Якщо h – висота предмета, а H – висота зображення, то можна знайти збільшення лінзи:

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d} \qquad (10.3.3)$$

Хід променів для побудови зображень.

1. Промінь, який упав на лінзу паралельно головній оптичній осі, заломившись пройде через фокус

2. Промінь, який упав на лінзу через фокус, заломившись пройде паралельно головній оптичній осі.

3. Промінь, який пройшов через оптичний центр, не заломлюється.

4. Промінь, який падає на лінзу паралельно побічній осі, після заломлення перетнеться з нею в фокальній площині.

Контрольні запитання до лекції №10.

1. Які докази можна навести на користь корпускулярної теорії світла?
2. Які докази можна навести на користь хвильової теорії світла?
3. Що таке світло?
4. Що називається геометричноюо птикою?
5. Що розуміють під променем?
6. Назвіть закони, які складають основугеометричної оптики.
7. Сформулюйте закон відбивання світла.
8. Сформулюйте закон заломленнясвітла.
9. Що називається абсолютним показником заломлення світла?
10. Що називається лінзою?

ЛЕКЦІЯ 11. ОСНОВИ ФОТОМЕТРІЇ. ФОТОМЕТРИЧНІ ВЕЛИЧИНИ. ХВИЛЬОВА ОПТИКА

11.1. Основні поняття фотометрії.

Фотометрія як самостійна галузь науки почала створюватися лише у XVIII столітті у зв'язку з потребою встановлення основних законів поширення світла, а також вимірювання електромагнітного випромінювання у видимому спектральному діапазоні. Творцем початкових основ фотометрії є француз П. Бугер, який вперше ввів поняття сили світла, освітленості і яскравості.

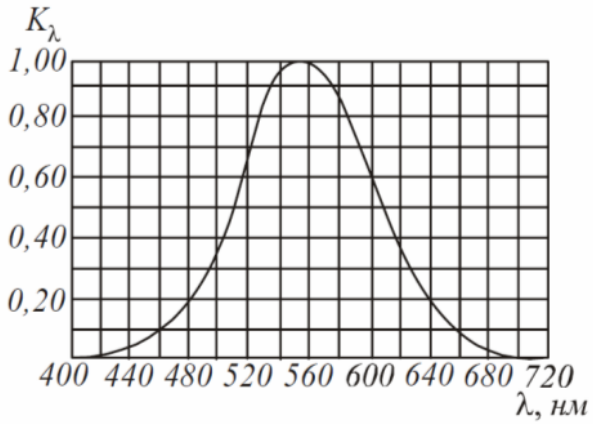


Рис. 11.1.1

Німецький фізик Йоганн Ламберт розвинув і вдосконалив теоретичні основи фотометрії. Ламбертом були сформульовані поняття світлових величин і створена теорія фотометричних розрахунків для визначення освітленості поверхонь світловим потоком, що падає на них від точкових випромінювачів.

Розділ оптики, в якому розглядаються питання вимірювання енергії, що переноситься електромагнітними хвилями оптичного діапазону, називається *фотометрією*.

Наше око сприймає з усього діапазону електромагнітних хвиль лише вузьку ділянку, звану видимим світлом. Цій ділянці відповідають довжини хвиль від 380 нм до 760 нм. Чутливість ока до світла з різними довжинами хвиль не однакова. Вона має максимум при λ=555 нм (зелена частина спектру) і швидко спадає до нуля при віддаленні від цього максимуму (рис. 11.1.1). На цьому графіку по горизонтальній осі відкладена довжина хвилі λ, по вертикальній – відносна спектральна чутливість ока K_λ.

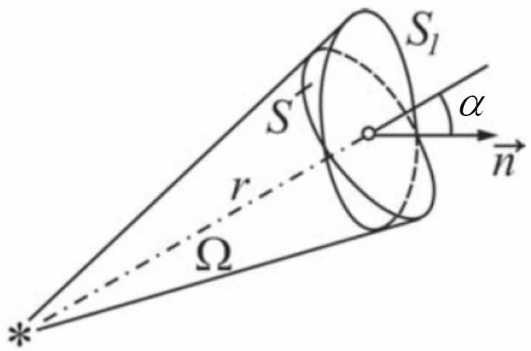


Рис. 11.1.2

Відносна спектральна чутливість K_λ – це відношення чутливості при даній довжині хвилі до чутливості при λ=555 нм. Для довжини хвилі λ=555 нм K_λ дорівнює одиниці. При тому ж потоці енергії оцінювана зорова інтенсивність світла для інших хвиль виявляється меншою. Відповідно, K_λ для цих довжин хвиль менше одиниці.

Тілесний кут – це кут, який утворений конічною поверхнею і чисельно дорівнює відношенню площини S, що вирізується цим конусом на поверхні сфери радіусом r, до квадрата радіусу цієї сфери

$$\Omega = \frac{S}{r^2} \qquad (11.1.1)$$

Тілесний кут вимірюється в стерадіанах (ср).

Якщо тілесний кут спирається на деяку площину S_1, нормаль до якої складає кут α з радіусом (рис. 11.1.2), то

$$\Omega = \frac{S_1 \cos\alpha}{r^2} \qquad (11.1.2)$$

Повний тілесний кут навколо точки дорівнює 4π стерадіан.

Для характеристики дії на око електромагнітних хвиль оптичного діапазону вводяться наступні фізичні величини, що характеризують світло з точки зору енергії, яку воно переносить: *світловий потік, сила світла, освітленість*.

Світловий потік (Φ) – це фізична величина, яка дорівнює потужності видимої частини випромінювання, що поширюється усередині даного тілесного кута і оцінюється за дією цього випромінювання на нормальне око.

Для інтервалу $d\lambda$ світловий потік визначається як добуток потоку енергії на відповідне значення функції K_λ:

$$d\Phi = K_\lambda d\Phi_e \tag{11.1.3}$$

Повний світловий потік дорівнює

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_\lambda d\Phi_e \tag{11.1.4}$$

де $d\Phi_e$ – потік енергії, що випромінюється в інтервалі довжин хвиль від λ до $\lambda+d\lambda$.

Джерело світла, розмірами якого можна нехтувати порівняно з відстанню від місця спостереження до джерела, називається *точковим*. Точкові джерела характеризують силою світла.

Сила світла (I) точкового джерела в даному напрямі – це фізична величина, яка дорівнює світловому потоку, що припадає на одиницю тілесного кута:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \tag{11.1.5}$$

Сила світла вимірюється в канделах. Кандела (кд) є однією з основних одиниць Міжнародної системи (СІ).

Якщо точкове джерело випромінює рівномірно по всіх напрямах, то воно називається *ізотропним*. Для ізотропного джерела виконується наступне співвідношення:

$$I = \frac{\Phi}{4\pi} \tag{11.1.6}$$

де Φ – повний світловий потік, що випромінюється джерелом. На підставі цього співвідношення вводиться одиниця вимірювання світлового потоку – *люмен*.

Люмен (лм) дорівнює світловому потоку, що випромінюється ізотропним джерелом з силою світла в 1 кд в межах тілесного кута в 1 стерадіан.

Освітленість (Е) – фізична величина, яка дорівнює відношенню світлового потоку до площі освітлюваної поверхні:

$$E = \frac{\Phi}{S} \tag{11.1.7}$$

Освітленість вимірюється в люксах.

Люкс (лк) – це освітленість, що створюється світловим потоком 1 лм, рівномірно розподіленим на площі 1 м^2.

Якщо поверхня освітлюється точковим джерелом, то освітленість в кожній точці поверхні може бути різною. Її можна виразити через силу світла I, відстань r від поверхні і кут α між нормаллю до поверхні $\vec{n}$ і напрямом на джерело:

$$E = \frac{I\cos\alpha}{r^2} \tag{11.1.8}$$

11.2. Інтерференція світла. Когерентність.

Згідно хвильової (електромагнітної) теорії світлове випромінювання – це електромагнітні хвилі, довжина яких лежить в межах від 0,38 до 0,78 мкм. Згідно з корпускулярної (фотонної) теорії світлове випромінювання – це потік особливих частинок – фотонів, які мають енергію, масу і імпульс.

Для довжини хвилі справедливе наступне співвідношення:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \tag{11.2.1}$$

де λ – довжина хвилі; c – швидкість світла у вакуумі (c=3·10^8 м/с); ν – частота випромінювання.

Хвильова оптика вивчає оптичні явища, в яких виявляється хвильова природа світла. До них відносяться *інтерференція*, *дифракція*, *поляризація*.

Інтерференцією світла називається явище накладання когерентних світлових хвиль, в результаті чого відбувається перерозподіл енергії світлового поля, тобто утворюються світлі ділянки (максимуми) і темні ділянки (мінімуми) інтерференційної картини.

Когерентні хвилі – хвилі, що мають однакову частоту і приходять в дану точку простору з різницею фаз, яка не змінюється з часом.

Вперше дослід по дослідженню інтерференції провів у 1802 році англійський фізик Томас Юнг. Юнг використовував дві ширми. Через першу непрозору ширму проходив вузький пучок світла через отвір А. У другій непрозорій ширмі було прорблено два отвори В і С. Відстань між отворами становила кілька міліметрів. На відстані близько метра від другої ширми був розташований екран, на якому спостерігалася інтерференційна картина (рис. 11.2.1). Тепер точки В і С можна вважати як два когерентних джерела.

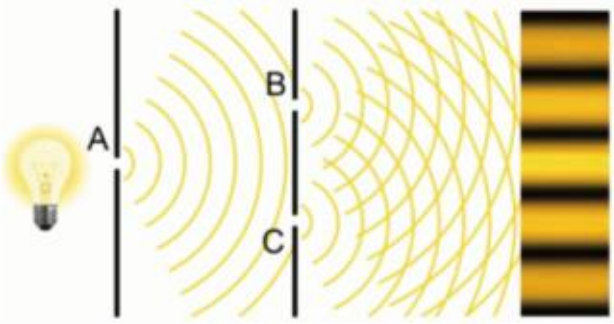


Рис. 11.2.1

Розглянемо накладення двох світлових хвиль, збуджених когерентними джерелами S_1 і S_2, в точці M (рис. 11.2.2). Для кожної хвилі запишемо рівняння напруженості електричного поля:

$$E_1(t, x_1) = A_1 \cos(\omega t - kx_1) \quad (11.2.2)$$

$$E_2(t, x_2) = A_2 \cos(\omega t - kx_2) \quad (11.2.3)$$

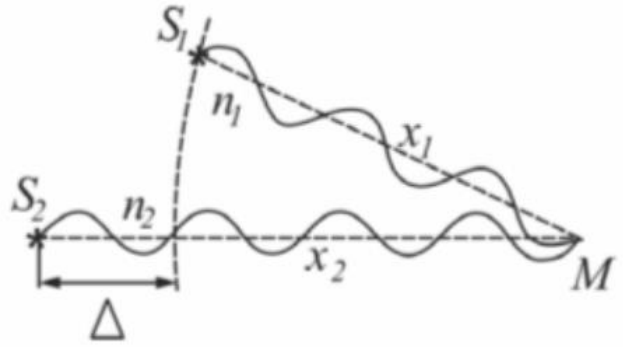


Рис. 11.2.2

$\omega = \dfrac{2\pi}{T}$, $k = \dfrac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число, показує, скільки довжин хвиль укладається на відстані 6,28 м.

Амплітуда результуючого коливання визначається формулою

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos\Delta\varphi \quad (11.2.4)$$

Як відомо, інтенсивність хвилі пропорційна квадрату амплітуди $I \sim A^2$. З урахуванням цього в останньому співвідношенні замінимо амплітуди через інтенсивності і отримаємо:

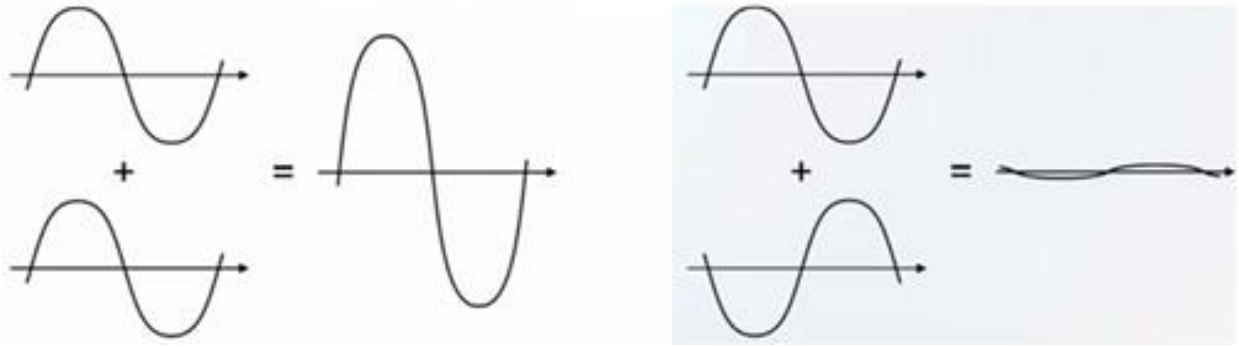
$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\Delta\varphi \quad (11.2.5)$$

Проаналізуємо (11.2.5). Якщо хвилі некогерентні, то $\Delta\varphi$ безперервно змінюватиметься, а $\cos\Delta\varphi$ прийматиме з рівною імовірністю будь-які значення від −1 до +1. Середнє значення за часом дорівнює нулю. Звідси можна зробити висновок, що при накладенні некогерентних хвиль результуюча інтенсивність світлової хвилі дорівнює сумі інтенсивності, що створює кожна з хвиль окремо:

$$I = I_1 + I_2$$

Якщо хвилі когерентні, то $\cos\Delta\varphi$ має стале в часі (але своє для кожної точки простору) значення. Якщо, $\cos\Delta\varphi > 0$, то $I > I_1 + I_2$, якщо $\cos\Delta\varphi < 0$, то $I < I_1 + I_2$. Таким чином, при накладенні когерентних хвиль відбувається перерозподіл енергії, в результаті якого в одних областях хвильового поля інтенсивність хвилі посилюється (виникають максимуми), а в інших – інтенсивність зменшується (виникають мінімуми).

Отже, якщо хвилі, що йдуть від двох отворів, приходять в точку синфазно, тобто максимум однієї хвилі приходить одночасно з максимумом другої хвилі, то хвилі підсилюють одна одну, і в результаті на екрані видно яскраву смугу. Якщо хвилі



а б

Рис. 11.2.3

приходять в протифазі, то вони послаблюють одна одну, і на екрані видно темну смугу (рис. 11.2.3).

Встановимо, які умови спостереження максимумів і мінімумів.

1. Інтенсивність максимальна, якщо у виразі (3), $\cos\Delta\varphi = 1$, або

$$\Delta\varphi = 2\pi m, \tag{11.2.6}$$

де m=0, 1, 2, 3., тобто ціле число. Число m називається порядком максимуму. Умова (11.2.6) є умовою максимумів інтерференції.

2. Інтенсивність мінімальна, якщо у виразі (11.2.5) $\cos\Delta\varphi = -1$, або

$$\Delta\varphi = \pi(2m+1) \tag{11.2.7}$$

де m=0, 1, 2, 3. Умова (11.2.6) є умовою мінімумів інтерференції.

Умовам максимумів і мінімумів можна надати іншого вигляду. Для цього знайдемо різницю фаз хвиль, що описуються рівняннями (11.2.2) та (11.2.3).

$$\Delta\varphi = \omega t - kx_1 - \omega t + kx_2 = k(x_2 - x_1) \tag{11.2.8}$$

Величину $x_2 - x_1 = \Delta x$ називають *геометричною різницею ходу.*

Якщо інтерферуючі промені проходять через два однорідні середовища з різними показниками заломлення n_1 і n_2, то замість геометричної різниці ходу Δx вводять поняття *оптичної різниці ходу* Δ:

$$\Delta = n_2 x_2 - n_1 x_1 \tag{11.2.9}$$

де $L=nx$ – оптичний шлях в однорідному середовищі.

Оптичний шлях – це скалярна величина, яка чисельно дорівнює добутку показника заломлення середовища на геометричний шлях, пройдений хвилею.

Тоді, використовуючи співвідношення (11.2.6), (11.2.7), (11.2.8) і (11.2.9) і замінивши хвильове число через довжину хвилі, можна отримати:

$$\Delta = 2m\frac{\lambda}{2} \tag{11.2.10}$$

$$\Delta = (2m+1)\frac{\lambda}{2} \tag{11.2.11}$$

де m=0, 1, 2, …, тобто ціле число.

Співвідношення (11.2.10) визначає *умову максимумів інтерференції*: *максимум інтерференції спостерігається, якщо оптична різниця ходу двох хвиль дорівнює парному числу півхвиль*.

Співвідношення (11.2.11) визначає *умову мінімумів інтерференції*: *мінімум інтерференції спостерігається, якщо оптична різниця ходу двох хвиль дорівнює непарному числу півхвиль*.

Отримані співвідношення можна представити у вигляді таблиці.

Таблиця 1. Умови максимумів і мінімумів інтерференції

Умова максимумів	$\Delta\varphi = 2m\pi$	$\Delta = 2m\frac{\lambda}{2}$
Умова мінімумів	$\Delta\varphi = (2m+1)\pi$	$\Delta = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$

При відбиванні хвилі від оптично густішого середовища фаза коливань вектора $\vec{E}$ змінюється на протилежну, тобто на π. Оптичний шлях при цьому змінюється на половину довжини хвилі:

$$L = nx - \frac{\lambda}{2} \text{ або } L = nx + \frac{\lambda}{2}$$

Контрольні запитання до лекції №11.

1. Що називається фотометрією?
2. Що називається відносною спектральною чутливістю?
3. Що називається світловим потоком та в яких одиницях вона вимірюється?
4. Що називається силою світла та в яких одиницях вона вимірюється?
5. Яке точкове джерело називається ізотропним?
6. Що називається освітленістю та в яких одиницях вона вимірюється?
7. Що називається інтерференціює світла?
8. Які хвилі називаються когерентними?
9. Запишіть умови спостереження максимумів та мінімумів інтерференції.
10. Що називають оптичним шляхом?

ЛЕКЦІЯ 12. ДИФРАКЦІЯ СВІТЛА. ВЗАЄМОДІЯ СВІТЛОВИХ ХВИЛЬ З РЕЧОВИНОЮ

12.1. Дифракція світла.

Дифракція – це сукупність явищ, які обумовлені хвильовою природою світла і спостерігаються при його поширенні в середовищі з різко вираженими неоднорідностями. У вузькому сенсі *дифракція* – це здатність світлової хвилі огинати перешкоди. При цьому необхідно відзначити наступне:

1. Якщо перешкода співрозмірна з довжиною хвилі, то хвиля її огинає;
2. Якщо перешкода більша довжини хвилі, то хвиля гаситься цією перешкодою.

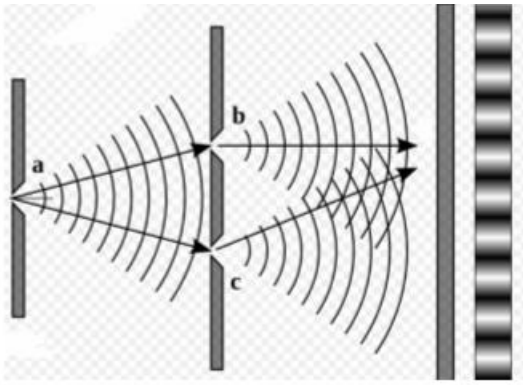


Рис. 12.1.1

Довгий час було неможливо експериментально довести дифракцію світла. Це пояснюється тим, що довжина світлової хвилі є малою, і тому перешкода має бути співрозмірна з довжиною світлової хвилі. Проте у 1802 році Томас Юнг (англійський фізик), який відкрив інтерференцію світла, поставив свій класичний дослід по дифракції. Він взяв ширму і проколов шпилькою в ній два отвори (b і c, рис. 12.1.1). Промінь світла, який виходив з отвору (a) першої ширми, розкладався на два світлових пучки. При цьому на екрані виникало чергування світлих і темних смуг – інтерференційна картина.

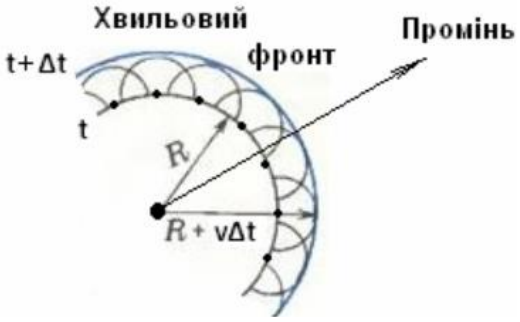


Рис. 12.1.2

Найголовнішим у цьому досліді було здогадатися зробити два когерентних джерела (b і c), у яких різниця фаз постійна.

Закони поширення хвиль легко зрозуміти скориставшись принципом Гюйгенса (Християн Гюйгенс нідерландський вчений-фізик). *Кожна точка поверхні, яку досягнула в даний момент хвиля є точковим джерелом вторинних хвиль. Поверхня, дотична до всіх вторинних хвиль, є хвильовою поверхнею в наступний момент часу* (рис. 12.1.2).

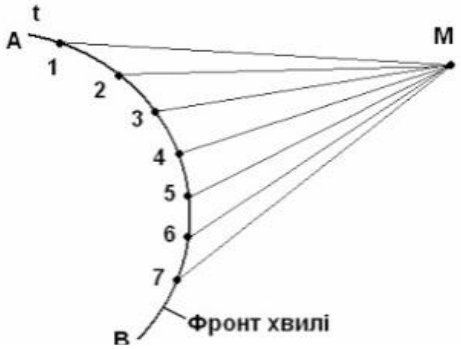


Рис. 12.1.3

Принцип Гюйгенса є чисто геометричним принципом, і він є справедливим для всіх видів хвиль: механічних, електричних та електромагнітних. Проте даний принцип не вказує на способи розрахунку амплітуди хвилі, що є огинаючою вторинних хвиль. Огюст Френель (французький фізик) доповнив принцип Гюйгенса. Запозичивши з нього уявлення про вторинні хвилі, Френель застосував до них закон інтерференції. За Френелем правило побудови огинаючої повинно бути замінено розрахунком взаємної інтерференції вторинних хвиль.

Принцип Гюйгенса-Френеля: *всі вторинні джерела, розміщені на поверхні фронту – когерентні між собою. Амплітуда і фаза хвилі в будь-який точці М простору – це результат інтерференції хвиль, які випромінюються вторинними джерелами* (рис. 12.1.3).

На рис. 12.1.3 АВ – фронт хвилі в момент часу t. 1, 2,... –когерентні джерела вторинних хвиль.

На явищі дифракції побудований такий прилад, як дифракційна решітка. *Дифракційна ґратка* – це спектральний оптичний прилад, призначений для розкладання світла в спектр і вимірювання довжин хвиль. Вона є плоскою скляною пластинкою, на яку за допомогою ділильної машини через строго однакові інтервали наносять паралельні штрихи. Проміжки між штрихами прозорі для світлових променів і грають роль щілин. Штрихи розсіюють промені і, тому, є непрозорими. Основним параметром ґратки є відстань між серединами сусідніх штрихів, яке називають *періодом d* (*сталою*) *дифракційних ґратки*:

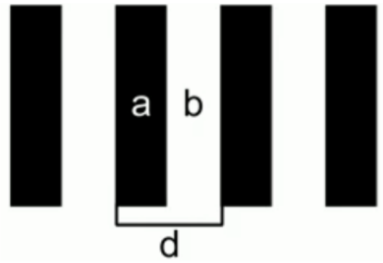


Рис. 12.1.4

$$d = a + b \qquad (12.1.1)$$

де b – ширина щілини, a – розмір перешкоди (рис. 12.1.4).

Нехай дифракційна гратка освітлюється монохроматичним світлом. Тоді кути, по яких будуть спостерігатися головні максимуми, будуть знаходитись по формулі:

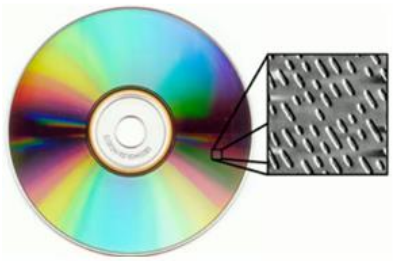


Рис. 12.1.5

$$d \sin \varphi = k\lambda \qquad (12.1.2)$$

де d – період гратки; α – кут, під яким спостерігається максимум; λ – довжина хвилі; k =0, 1, 2, 3 … – порядок (номер) дифракційного максимуму (ціле число). Максимуми для різних довжин хвиль будуть спостерігатися під різними кутами, тобто білий світ буде розкладений в спектр.

На 1 мм дифракційної гратки може бути нанесене $10^3 \div 10^5$ штрихів, а період ґратки може мати значення (1÷10) мкм.

Основне застосування дифракційної решітки – це спектральний аналіз. Перевага дифракційних решіток перед іншими спектральними приладами полягає в тому, що спектр виходить більш яскравим. Інтенсивність в головному максимумі пропорційна квадрату повного числа щілин дифракційної решітки.

У побуті також можна зустріти дифракційні грати. Наприклад, на компакт-диску розташовані смужки, що чергуються і представляють собою дифракційну гратку (рис. 12.1.5).

Будь кристал також є дифракційною граткою. На цьому побудований такий метод кристалографії, як рентгеноструктурний аналіз. Кристал опромінюється рентгенівськими променями, і по їх дифракційній картині можна визначити тип кристалічної решітки та розрахувати її період.

12.2. Дисперсія світлових хвиль.

Для того, щоб дослідити дисперсію, у 1276 році Ньютон, який і придумав цю назву, поставив наступний експеримент. Він взяв трикутну призму і пропустив через неї тонкий промінь світла. Промінь світла розклався на складові, на екрані з'явилися всі кольори (рис. 12.2.1). Так як передбачалося, що у веселки сім кольорів, Ньютон виділив саме сім кольорів: червоний, оранжевий, жовтий, зелений, блакитний, синій, фіолетовий. При цьому світло з більшою довжиною хвилі відхилялось на менший кут.

Ньютон побачив, що якщо закрити отвір червоним склом, то залишиться тільки червоний колір, якщо зеленим склом, то тільки зелений колір і т. д. Це означає, що призма не фарбує білий колір в різні кольори, а всього лише розкладає єдиний білий колір на складові. Якщо взяти і перевернути призму, то можна всі ці кольори зібрати в єдиний пучок світла.

Також виявилося, що абсолютний показник заломлення n залежить не тільки від швидкості світла, але і від швидкості, з якою рухається даний пучок в речовині

$$n = \frac{c}{\vartheta} \qquad (12.2.1)$$

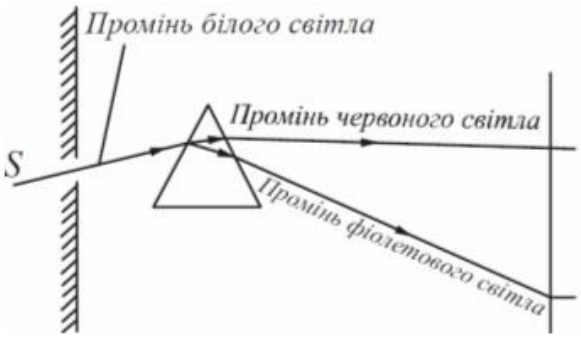


Рис. 12.2.1

Таку залежність можна записати лише для певної довжини хвилі. Експериментальні дослідження засвідчують, що хвилі різних довжин (частот) поширюються в певному середовищі з різними швидкостями. Це пояснюють тим, що хвилі різної довжини зазнають різних впливів з боку речовини. Наслідком залежності швидкості поширення електромагнітної хвилі від її частоти є залежність показника заломлення від довжини хвилі:

$$n = f(\lambda) \qquad (12.2.2)$$

Явище залежності показника заломлення від довжини хвилі називають *дисперсією*.

Таким чином, виходить, що ніякого червоного кольору в природі не існує, коли ми дивимося на що-небудь і бачимо, що цей предмет червоний, це означає що відбиваються тільки промені певної довжини хвилі, яка відповідає червоному кольору. Наш мозок, обробляючи інформацію, розпізнає цей колір як червоний. Якщо у нас нічого не відбивається, то ми називаємо цей колір чорним.

Дисперсія хвиль обумовлює багато природних явищ і широко використовується в техніці. Наприклад, всі різновиди веселок пояснюються спектральним розщеплюванням (із-за дисперсії світла) і дифракцією сонячних променів в дощових краплях.

12.3. Взаємодія світлових хвиль з речовиною.

На характер поширення електромагнітних хвиль істотно впливає середовище, в якому вони поширюються. Якщо середовище оптично однорідне, то відстань між частинками середовища менше довжини світлової хвилі. Тому вторинні хвилі, що випромінюються безліччю сусідніх молекул, когерентні і інтерферують при накладенні, гасячи одна одну на всіх напрямках, окрім напряму первинної хвилі. В результаті інтерференції в однорідному ізотропному середовищі утворюється проходяча хвиля, фазова швидкість якої залежить від частоти, а напрям поширення співпадає з напрямом поширення первинної хвилі.

У неоднорідному середовищі вторинні бічні хвилі не гасять одна одну. Реальні середовища є неоднорідними, тому в реальних середовищах спостерігаються такі явища як розсіяння, дисперсія, повне внутрішнє відбивання. На межі розділу двох середовищ хвилі можуть зазнавати заломлення, відбивання і т. д.

Розсіянням світла називається явище перетворення світла речовиною, що супроводжується зміною напряму поширення світла і виявляється як невласне свічення речовини. В однорідних середовищах вторинні хвилі, що випромінюються електронами, які коливаються, гасять одна одну за всіма напрямками, окрім напряму первинної хвилі. Тому розсіяння світла в однорідному середовищі не відбувається.

У неоднорідному середовищі вторинні хвилі дифрагують на неоднорідностях середовища і дають дифракційну картину, яка характеризується рівномірним розподілом інтенсивності за всіма напрямками.

Середовища з явно вираженою оптичною неоднорідністю називаються *каламутними* середовищами. До них відносяться: 1) дим – суспензія в газі найдрібніших твердих частинок; 2) туман – суспензія в газі найдрібніших рідких частинок; 3) суспензії, що утворені плаваючими в рідині твердими частинками; 4) емульсії – суспензії

найдрібніших частинок однієї рідини в іншій, яка не розчинює першу. Прикладом емульсії є молоко.

Навіть дуже ретельно очищені гази і рідини в деякій мірі розсіюють світло. Причиною цього є флуктуації густини (відхилення густини від середніх значень, що спостерігається в межах малих об'ємів). Ці флуктуації викликані невпорядкованим рухом молекул речовини. Обумовлене ним розсіяння називається *молекулярним*.

Молекулярним розсіянням пояснюється блакитний колір неба. Через невпорядкований рух молекул в атмосфері безперервно виникають місця згущування і розрідження повітря, які розсіюють світло. Інтенсивність розсіяного світла обернено пропорційна четвертому ступеню довжини хвилі, тому блакитні і сині промені розсіваються сильніше, ніж жовті і червоні, що і обумовлює блакитний колір неба. Коли Сонце знаходиться низько над горизонтом, промені, що поширюються від нього, проходять велику товщину розсіюючого середовища. В результаті цього вони виявляються збагаченими хвилями більшої довжини. Тому небо на зорі забарвлюється в червоні тони.

Поглинанням світла називається явище зменшення енергії світлової хвилі при її поширенні в речовині, що відбувається внаслідок перетворення енергії хвилі у внутрішню енергію речовини. Поглинання світла може викликати нагрівання речовини, збудження і іонізацію атомів або молекул, фотохімічні реакції і інші процеси в речовині.

Інтенсивність *I* електромагнітної хвилі, що пройшла поглинаючий шар товщиною *x*, визначається законом Бугера-Ламберта (Бугер – французький фізик, Ламберт – німецький фізик):

$$I = I_0 e^{-\mu x} \qquad (12.3.1)$$

де I_0 – інтенсивність електромагнітної хвилі на межі середовища; μ – коефіцієнт поглинання, який залежить від хімічної природи і стану середовища, а також від частоти випромінювання.

Заломленням світла називається зміна напряму поширення хвилі в неоднорідному середовищі, обумовлене залежністю фазової швидкості від властивостей середовища. Розрізняють заломлення на плоскій межі розділу двох однорідних середовищ і заломлення електромагнітних хвиль в плавно неоднорідному середовищі (у масштабі довжин хвиль). Заломлення світла на плоскій межі розділу двох однорідних середовищ, підпорядковується закону Снелліуса.

Від межі розділу діелектриків поширюються дві плоскі хвилі – відбита і заломлена. При цьому інтенсивності падаючої хвилі $I_{пад}$ з відбитою $I_{від}$ і заломленою $I_{залом}$ зв'язані співвідношеннями:.2

$$I_{від} = I_{пад}\left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2; \qquad I_{залом} = I_{пад}\left(\frac{2n}{n+1}\right)^2 \qquad (12.3.2)$$

де *n* – показник заломлення середовища.

Контрольні запитання до лекції №12.

1. Що називається дифракцією світла?
2. Опишіть дослід Юнга по дослідженнюдифракції.
3. Сформулюйте принцип Гюйгенса та принцип Гюйгенса-Френеля.
4. Що називається дифракційною граткою?
5. Що називається періодом дифракційних ґратки?
6. Що називається дисперсією світлових хвиль?
7. Що називається розсіянням світла?
8. Які середовища називаються каламутними. Наведіть приклади таких середовищ.
9. За яким законом описується процес поглинання світла?
10. Що називається заломленням світлових хвиль?

ЛЕКЦІЯ 13. КВАНТОВА ФІЗИКА. РАДІОАКТИВНІСТЬ. МОДЕЛІ БУДОВИ АТОМА

13.1. Квантова гіпотеза Планка.

З 1896 року Макс Планк (німецький фізик-теоретик) зацікавився проблемами теплового випромінювання тіл. Адже електродинаміка Максвелла приводила до безглуздого висновку: нагріте тіло в результаті постійного випромінювання електромагнітних хвиль повинно було охолонути до нуля .

Намагаючись подолати труднощі класичної фізики щодо пояснення випромінювання нагрітого твердого тіла Макс Планк у 1900 році висловив таку гіпотезу: *нагріте тіло випускає світло не безперервно, а певними скінченними порціями енергії – квантами (квант (від лат. quantum) – кількість).* Ця енергія пропорційна частоті коливань електромагнітного випромінювання:

$$E = h\nu \tag{13.1.1}$$

де ν – частота коливань електромагнітного випромінювання; $h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}\ Дж \cdot с$ – стала Планка. Її ще називають квантом дії.

Ейнштейн в свою чергу висловив гіпотезу, згідно якої світло поглинається речовиною окремими квантами і поширюється у вигляді окремих частинок – фотонів. Інтенсивність світла визначається кількістю фотонів, що падають за одиницю часу на одиницю площі поверхні.

Фотон – це елементарна частинка, квант електромагнітного випромінювання, що не має маси спокою і рухається із швидкістю світла.

Релятивіську масу фотона знайдемо з формули взаємозв'язку маси і енергії. За формулою Ейнштейна $E = mc^2$. З іншого боку енергія фотона $E = h\nu$. Прирівнявши ці співвідношення, знайдемо масу фотона:

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} \tag{13.1.2}$$

Імпульс фотона

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} \tag{13.1.3}$$

Використовуючи співвідношення, що зв'язує швидкість довжину хвилі і частоту $c = \lambda\nu$, імпульс фотона можна виразити формулою:

$$p = \frac{h}{\lambda} \tag{13.1.4}$$

де λ – довжина хвилі у вакуумі.

За сучасними уявленнями світло випромінюється і поглинається порціями, а тому і поширюється порціями. Фотон зберігає свою індивідуальність протягом всього свого існування. Водночас світлу властиві явища інтерференції, дифракції, поляризації та інші хвильові властивості. Ці факти дозволили зробити припущення, що світлу властивий дуалізм (подвійність). Під час поширення світло виявляє електромагнітні властивості, а під час поглинання – корпускулярні.

13.2. Зовнішній фотоелектричний ефект. Закони фотоефекту.

Зовнішнім фотоефектом називається явище звільнення електронів з поверхневого шару речовини під дією світла. Електрони, що вилітають з речовини, називаються фотоелектронами, а електричний струм, що утворюється ними при русі у зовнішньому електричному полі, називається фотострумом. Відкрито явище Герцем (німецький фізик) у 1887 році, основні закономірності встановлені у 1888-1889 роках Столєтовим (російський фізик).

На підставі експериментів були встановлені закони фотоефекту.

1. *Кількість фотоелектронів прямо пропорційна інтенсивності світла.*

2. Максимальна кінетична енергія фотоелектронів лінійно залежить від частоти падаючого світла і не залежить від його інтенсивності.

3. Для кожної речовини існують порогові значення частоти (ν_0) та довжини хвилі (λ_0) світла, які відповідають межі існування фотоефекту. Світло з меншою частотою ($\nu < \nu_0$) та більшою довжиною ($\lambda > \lambda_0$) хвилі фотоефекту не викликає. Довжину хвилі λ_0 називають червоною межею фотоефекту.

У разі поглинання світла речовиною кожен поглинений фотон передає всю свою енергію електрону. Частину цієї енергії електрон витрачає на здійснення роботи виходу $A_{вих}$ з речовини. Роботою виходу називається мінімальна енергія, яку необхідно передати електрону для того, щоб видалити його з твердого тіла у вакуум. Залишок енергії утворює кінетичну енергію електрона, що покинув речовину. В цьому випадку за законом збереження енергії повинно виконуватися співвідношення:

$$h\nu = A_{вих} + \frac{m\upsilon_{\max}^2}{2} \qquad (13.2.1)$$

яке називається рівнянням Ейнштейна для фотоефекту. З рівняння Ейнштейна безпосередньо випливає другий закон фотоефекту:

$$\frac{m\upsilon_{\max}^2}{2} = h\nu - A_{вих} \qquad (13.2.2)$$

тобто максимальна кінетична енергія фотоелектронів лінійно залежить від частоти, оскільки робота виходу для даної речовини величина стала.

При $\nu = \nu_0$ кінетична енергія дорівнює нулю. При цьому

$$h\nu_0 = A_{вих} \qquad (13.2.3)$$

тобто червона межа фотоефекту визначатиметься природою речовини.

13.3. Радіоактивність як свідчення складної будови атомів.

Після відкриття періодичного закону довгий час залишалось незрозумілим, чому властивості елементів знаходяться в періодичній залежності від їхньої відносної атомної маси. Була незрозумілою сама причина періодичності. Необхідно було з'ясувати фізичний зміст періодичного закону. Це стало можливим після встановлення будови атома. Тривалий час у науці панувало уявлення про те, що атоми є неподіленими частинками. Однак наприкінці дев'ятнадцятого століття було зафіксовано факти, які свідчили про складну будову атома. Особливу роль відіграло відкриття радіоактивності (самоплинного розпаду атомів деяких елементів).

У 1896 році французький фізик А. Бекерель визначив, що матеріали, які містять Уран, засвітлюють у темряві фотопластинку, іонізують гази, викликають світіння речовин, що здатні флуоресціювати. Саме це призвело до відкриття радіоактивності. Сам Беккерель це випромінювання, що призводить до таких ефектів, називав Х-променями за аналогією з променями Рентгена. І надалі, вивчаючи випромінювання солей урану, він прийшов до висновку: це якраз ті промені, які пов'язані з особливостями самої речовини, тобто наявність урану забезпечу ось це саме Х-випромінювання.

Вслід за Бекерелем за вивчення радіоактивності взялися й інші вчені. У першу чергу французькі вчені Марія Склодовська-Кюрі та її чоловік П'єр Кюрі. Подружжя Кюрі, протягом двох років вивчаючи питання, пов'язане з радіоактивністю, встановили, що й інші елементи мають аналогічним випромінюванням, наприклад, торій.

Досліджуючи радіоактивність, Кюрі вдалося отримати ряд нових хімічних елементів. Один з таких елементів – радій, який в мільйони разів активніший, ніж уран. Другий елемент – полоній, менш активний, але теж володіє радіоактивністю і названий на честь батьківщини Марії Склодовської-Кюрі – Польщі.

Вслід за подружжям Кюрі вивченням радіоактивності став займатися англійський вчений Ернест Резерфорд. І в 1899 році він провів експеримент з вивчення складу радіоактивного випромінювання.

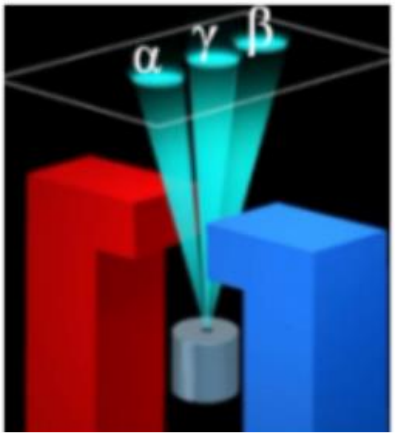


Рис. 13.3.1

У свинцевий циліндр була поміщена сіль урану. Через дуже вузький отвір в цьому циліндрі промінь потрапляв на фотопластинку, розташовану над цим циліндром (рис. 13.3.1). На самому початку експерименту магнітного поля не було. Тому фотопластинка так само, як і в дослідах подружжя Кюрі, так само, як в дослідах А. Беккереля, засвічувалась в одній точці. Потім було включено магнітне поле, причому так, що величина цього магнітного поля могла змінюватися. В результаті при малому значенні магнітного поля промінь розділився на дві складові. А коли магнітне поле стало ще більше, з'явилася третя темна пляма. Ось ці плями, які утворилися на фотопластинці, назвали α - , β - і γ - променями.

Разом з Резерфордом над проблемою вивчення радіоактивності працював англійський хімік Содді. Содді разом з Резерфордом поставили експеримент з вивчення хімічних властивостей цих випромінювань. Стало ясно, що :

α - промені – потік досить швидких ядер атомів гелію;

β - промені – потік швидких електронів;

γ - промені (γ-випромінювання) – це жорстке електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі $\lambda<10^{-10}$ м. Має велику проникаючу здатність, оскільки енергія квантів $\varepsilon\geq10^{4}$ еВ.

В результаті проведених експериментів, з'ясувалося, що всередині атома відбуваються якісь складні процеси, які призводять до такого випромінювання. З часів Стародавньої Греції всі вважали, що атом – це дрібна частинка хімічного елемента з усіма його властивостями, і вже менше цієї частинки в природі не існує. У результаті відкриття радіоактивності, *мимовільного випромінювання різних електромагнітних хвиль і нових частинок ядер атомів* можна говорити про те, що і атом також є подільним, тобто складається з чогось і має складну структуру.

13.4. Моделі атомів. Дослід Резерфорда.

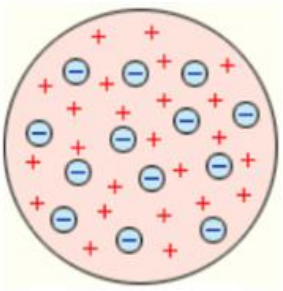
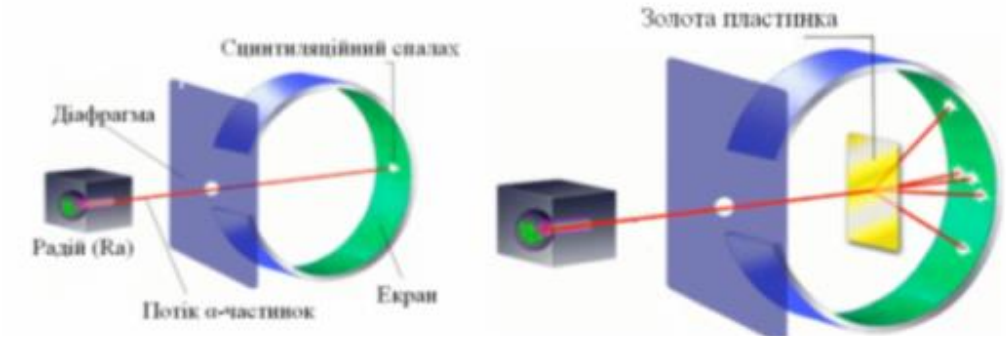


Рис. 13.4.1

Після того як стало ясно, що атом теж має складну структуру, необхідно було дослідити саму будову атома, пояснити, з чого він складається. Перші ідеї про складну будову атома були висловлені Томсоном, який в 1897 році відкрив електрон. У 1903 році Томсон вперше запропонував свою модель атома. По теорії Томсона атом представляв собою сферу, по всьому об'єму якої „розмазаний" позитивний заряд, а всередині, як плаваючі елементи, знаходилися електрони (рис. 13.4.1). В цілому, за Томсоном, атом був електронейтральним, тобто заряд такого атома дорівнював 0. Негативні заряди електронів компенсували позитивний заряд самого атома. Розмір атома становив приблизно 10^{-10} м. Модель Томсона отримала назву „пудинг з родзинками": сам „пудинг" – це позитивно заряджене „тіло" атома, а „родзинки" – це електрони. Проте запропонована Томсоном модель атома були лише гіпотезою і не підтверджена експериментальними даними.

Перший достовірний експеримент з визначення будови атома вдалося провести Е. Резерфорду. На сьогоднішній день ми знаємо, що атом являє собою структуру, що

нагадує планетарну сонячну систему. У центрі знаходиться масивне тіло, навколо якого обертаються планети. Така модель атома отримала назву планетарної моделі.



а б

Рис. 13.4.2

Всередину свинцевого циліндра з вузьким отвором був поміщений радій. За допомогою діафрагми створювався вузький пучок α-частинок, які, пролітаючи через отвір діафрагми, потрапляли на екран, покритий спеціальною речовиною (рис. 13.4.2, а). При попаданні виникав мікроспалах. Таке світіння при попаданні частинок на екран називається „сцинтиляційним спалахом". Такі спалахи спостерігалися на поверхні екрану за допомогою мікроскопа. Поки в схемі не було золотої пластини, всі частинки, які вилітали з циліндра, потрапляли в одну точку. Як тільки на шляху α-частинок була поставлена золота пластинка, почалося їх відхилення. Були помічені частинки, які відхилялися від свого початкового прямолінійного руху і вже потрапляли в зовсім інші точки цього екрану (рис. 13.4.2, б). Більше того, коли екран зробили майже замкнутим, з'ясувалося, що є частинки, які якимось чином летять у зворотний бік. Вони відхиляються під кутом 90° і більше.

У першу чергу тут потерпіла крах теорія Томсона, адже електрони – це дуже маленькі частинки, вони не можуть перешкоджати α- частинкам, що летять з швидкістю близько 10000 км/с. В даному випадку можна привести таку аналогію зіткнення α-частинки з електроном: вантажівка рухаючись зіштовхується з іграшковим автомобілем. Зрозуміло, що вантажівка навіть не помітить такого автомобіля. Значить, необхідно було зробити висновок, що атом влаштований інакше, не так, як стверджував Томсон. Мабуть, в атомі золота є об'єкт більш масивніший, ніж α- частинка, що має позитивний заряд.

Рис. 13.4.3

За результатами дослідів можна було говорити, що в атомі є масивний позитивно заряджений об'єкт. α- частинка, стикаючись з цією великою частинкою, може відбитися назад. Ті частинки, які пролітають поруч, відхиляються на різні кути. Чим далі α- частинки пролітає від цього об'єкта, тим на менший кут вони відхиляються (рис. 13.4.3). Таке явище отримало назву „розсіювання-частинок".

Велику частинку, яка знаходиться всередині атома, Резерфорд назвав ядром. За оцінкою Резерфорда, розміри ядра склали 10^{-14} - 10^{-15} м. Цей об'єкт був дуже і дуже малий по своїх розмірах в порівнянні з атомом. Атом має розмір близько 10^{-10} м. При цьому практично вся маса атома зосереджена саме в ядрі, навколо якого обертаються електрони.

Звідси випливає планетарна модель Резерфорда, яка стверджує, що атом являє собою масивне позитивно заряджене ядро, навколо якого по своїх орбітах обертаються

електрони (рис. 13.4.4). В цілому атом електронейтральний, тобто заряд атома дорівнює нулю. Якщо у атома надлишок або нестача електронів, то його називають іоном.

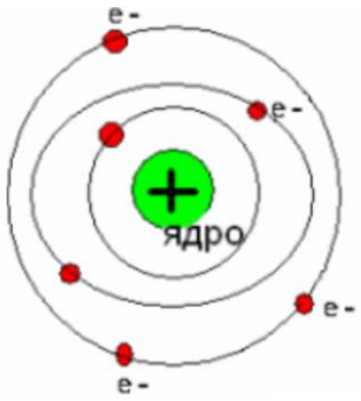


Рис. 13.4.4

Планетарна модель атома багато пояснила в будові атома, але одразу після її створення виникли труднощі: ядро заряджене позитивно, а електрони – негативно. Між ними існує кулонівська сила притягання. Для того, щоб електрони не впали на ядро, вони мусять рухатись навколо нього з доцентровим прискоренням. З теорії Максвелла випливає, що якщо заряд рухається з прискоренням, то при цьому має випромінюватись електромагнітна хвиля, а розрахунки показують, що за час $\Delta t = 10^{-8}$ с електрон, рухаючись по спіралі мусить припинити свій рух. Дослідні ж дані показували, що за нормальних умов атом не випромінює енергію і існує як завгодно довго.

Вихід із ситуації 1913 року запропонував датський фізик Нільс Бор. Він створив теорію атома на основі таких постулатів:

1. Атомна система може перебувати тільки в особливих стаціонарних, або квантових станах, кожному з яких відповідає певна енергія E_n. У стаціонарному стані атом енергію не випромінює.
2. Перехід атома з одного стаціонарного стану в інший супроводжується випромінюванням чи поглинанням фотонів, енергію яких $h\nu$ визначають за формулою $h\nu_{kn} = E_k - E_n$, де k і n – номери його стаціонарних станів. При $E_k > E_n$ відбувається випромінювання фотона, а при $E_k < E_n$ – його поглинання.

Перейнявшись ідеями Резерфорда, Бор на основі планетарної моделі розвиває теорію будови атома, яка згодом була названа моделлю Резерфорда–Бора.

Контрольні запитання до лекції №13.

1. Сформулюйте гіпотезу Планка.
2. Що таке фотон. Якзнайти масу та імпульс фотона?
3. Що називається зовеішнім фотоефектом?
4. Сформулюйте закони фотоефекту.
5. Запишіть рівняння Ейнштейна для фотоефекту.
6. Що таке радіоактивність?
7. Що таке α, β та γ промені?
8. Опишіть дослід Резерфорда.
9. В чому полягає суть планетарної моделі атома?
10. Сформулюйте постулати Бора.

ЛЕКЦІЯ 14. БУДОВА АТОМА І АТОМНОГО ЯДРА. ЕНЕРГІЯ ЗВ'ЯЗКУ. ДЕФЕКТ МАС

14.1. Склад атомного ядра. Масове число. Зарядове число. Ядерні сили.

Найважливішими характеристиками атомного ядра є його електричний заряд $q_я$ та маса $m_я$. Оскільки атом в цілому електронейтральний, заряд ядра визначає кількість електронів у атомі, тобто порядковий номер хімічного елемента:

$$q_я = Ze \qquad (14.1.1)$$

Ціле число Z називають *зарядовим числом*. Зарядове число збігається з порядковим номером хімічного елемента в періодичній системі елементів Д.І. Менделєєва.

Для позначення різних ізотопів хімічних елементів використовують запис: ${}^{A}_{Z}X$, де X – символьне позначення хімічного елемента, A – масове число, тобто ціле число, найближче до атомної маси елемента, вираженої в а.о.м., Z – порядковий номер хімічного елемента. Дослідженням ізотопів займався англійський радіохімік Ф. Содді, який і ввів це поняття в 1913 р. Саме Ф. Содді вперше запропонував розміщувати хімічні елементи в періодичній системі не за атомною масою, як Д.І. Менделєєв, а за електричним зарядом ядра (спосіб вимірювання зарядового числа запропонував англійський фізик Г. Мозлі у 1913 р.). Тобто в одній клітинці Содді розміщував декілька ізотопів з різними атомними масами. Така традиція збереглася і донині.

Маси атомів зручно вимірювати в атомних одиницях маси (а.о.м.). За 1 а.о.м. прийнято 1/12 частину маси вуглецю (1 а.о.м.=1,6605655(86)·10^{-27} кг). Виявилося, що існують речовини з однаковим зарядовим числом Z, проте з різною масою ядра $m_я$. Такі різновиди хімічних елементів називають *ізотопами* (гр. isos – однаковий + topos – місце). Наприклад, у водню таких ізотопів три: протій (${}^{1}_{1}H$), дейтерій (${}^{2}_{1}H$) та тритій (${}^{3}_{1}H$). Ізотопи займають одну і ту ж клітинку в періодичній системі елементів. На даний час відомо більше 1500 ізотопів різних хімічних елементів. Атомну масу ізотопу називають *ізотопною масою*.

Існують також ядра, що мають однакове масове число A, проте різні зарядові числа Z. Такі хімічні елементи називають *ізобарами* (гр. isos – однаковий + baros – вага). Відкрив ізобари англійський фізик Ф.В. Астон.

Після створення Е. Резерфордом ядерної моделі атома, виявленню ізотопів та ізобар, актуальним стало питання про склад атомного ядра. До 1930 р. із елементарних частинок були відомі лише виявлений експериментально Дж.Дж. Томсоном електрон e, постульований у 1913 р. Резерфордом та Неттолом і експериментально виявлений у 1925 р. Блеккетом протон p (гр. protos – перший) та постульований у 1920 р. Резерфордом і експериментально виявлений Чедвіком у 1932 р. нейтрон n (англ. neutron, від лат. neuter – ні той, ні інший). Саме відкриття нейтрона призвело до змін уявлень про будову атомного ядра.

У 1932 році російські фізики Д. Д. Іваненко та Є. М. Гапон і незалежно від них німецький фізик Гейзенберг запропонували протонно-нейтронну будову атома. Згідно з цією теорією атомне ядро складається з протонів і нейтронів. Ці частинки мають спільну назву – *нуклони*. Протони, нейтрони, так само як і електрони, належать до елементарних частинок. *Протон* p – це частинка з відносною масою приблизно рівною одиниці і відносним зарядом +1. *Нейтрон* n – це електронейтральна частинка з відносною масою приблизно рівною одиниці.

Рівняння, що пов'язує масове число A, порядковий номер Z елемента та число нейтронів у ядрі N називається рівнянням Іваненко-Гейзенберга і записується у вигляді:

$$A=Z+N \qquad (17.1.2)$$

Масове число A говорить про те, яка кількість нуклонів входить в ядро. Виявилося, що, по таблиці Менделєєва визначаючи масове число хімічного елемента, ми визначаємо

число нуклонів в ядрі атома. *Z,* як зазначалось вище, порядковий номер і число протонів в ядрі. *N* в рівнянні (17.1.2) – це число нейтронів. Таким чином, ми можемо з цього рівняння визначити число нейтронів, число протонів, знаючи масове число і порядковий номер хімічного елемента.

Протони і нейтрони утримуються в середині ядра атома за допомогою сил, які називаються ядерними силами. *Ядерні сили* – це сили притягання, що діють між нуклонами. Можна сказати, що у цих сил існують свої особливі властивості.

1) Ядерні сили повинні бути більшими за сили електростатичного відштовхування. І це так, коли вдалося їх визначити, то з'ясувалося, що вони в 100 разів більші за сили електростатичного відштовхування.

2) Ядерні сили діють на малій відстані. Наприклад, 10^{-15} м – це є діаметр ядра і разом з тим та відстань, на якій ці сили діють. Але варто тільки збільшитися розміром ядра до 10^{-14} м, то це призводить до того, що ядро обов'язково розпадеться. На цій відстані вже ядерні сили не діють. А сили електростатичного відштовхування продовжують діяти і саме вони відповідають за те, що ядро розпадається.

3) Ядерні сили не центральні, тобто вони не діють вздовж прямої, що з'єднує ці частинки.

4) Ядерні сили не залежать від того, має частинка заряд чи ні, оскільки в ядрові знаходяться і протони, і нейтрони. Отже нуклони утримуються в ядрі за рахунок ядерних сил і ці сили діють тільки в ядрі.

5) Ядерні сили мають важливе значення в плані стабільності ядра. Вони відповідають за довготривалість існування того чи іншого елемента.

14.2. Енергія зв'язку. Дефект мас.

Рис. 14.2.1

Як відомо, до складу ядра атома входять протони і нейтрони, між якими діють ядерні сили (рис. 14.2.1). Після того, як була висунута протонно-нейтронна модель ядра атома, багато вчених стали намагатися змінити хімічний елемент, тобто за рахунок яких-небудь ядерних реакцій перетворювати одні елементи в інші.

Щоб провести таку ядерну реакцію, потрібно щось зробити з ядром, якось поміняти число протонів. У цьому випадку зміниться і порядковий номер елемента, а значить, і сам хімічний елемент. Щоб розбити ядро на складові частини, потрібна певна енергія. Ось цю енергія стали називати енергією зв'язку. Енергія, яку необхідно затратити, щоб розщепити ядро на окремі нуклони *називається енергією зв'язку* ($E_{зв}$).

На початку XX століття А. Ейнштейн показав, що існує пряма залежність між енергією і масою тіла:

$$E = mc^2 \qquad (14.2.1)$$

де E – енергія, m – маса тіла, c – швидкість світла (c=3·10^8 м/с).

Коли стали з'ясовувати, як визначити енергію зв'язку, з'ясувалося, що це можна зробити, використовуючи це рівняння Ейнштейна.

Але яку масу слід підставити у формулу Ейнштейна? Тут варто зауважити, що коли стали визначати маси ядер і порівнювати їх з сумарною масою нуклонів, з'ясувалося, що маса ядра завжди виходить менше сумарної маси окремо взятих нуклонів. Виходить дивна річ: якщо ми зберемо нуклони, що входять в ядро атома, порахуємо їх масу окремо, то ця маса виявиться більше, ніж маса самого ядра, того елементу, яке з цих нуклонів складається.

$$Zm_p + Nm_n > M_я \qquad (14.2.2)$$

де Z – число протонів в ядрі; m_p – маса протона; N – число нейтронів; m_n – маса нейтрона.

Цю „втрачену" частину назвали дефектом маси. *Дефект маси* – різниця між сумою мас спокою складових його нуклонів (масовим числом) і масою спокою атомного ядра даного ізотопу, вираженої в атомних одиницях маси:

$$\Delta m = \left(Zm_p + Nm_n\right) - M_я = \left(Zm_p + \left(A - Z\right)m_n\right) - M_я \qquad (14.2.3)$$

Дефект маси мають практично всі хімічні елементи таблиці Менделєєва. Виняток становить тільки один елемент – це протій, водень, у якого ядро складається з одного протона. Там немає нейтронів. Якби вони були, то і тут був би присутній дефект мас. У дейтерію, наприклад , дефект маси вже є, у тритію теж. Чим масивніше ядро, чим більше нуклонів входить до його складу, тим і дефект маси буде більшим. Отже, дефект маси дає можливість визначити енергію зв'язку, тобто ту саму енергію, яка захована в ядрі.

Енергія зв'язку, з використанням рівняння Ейнштейна визначається за формулою:

$$E_{зв} = \Delta mc^2 = \left(Zm_p + \left(A - Z\right)m_n - M_я\right) \cdot c^2 \qquad (14.2.4)$$

Якщо масу виразити в а.о.м., то енергія зв'язку обчислюється за формулою

$$E_{зв} = 931{,}15\Delta m \qquad (14.2.5)$$

оскільки одній атомній одиниці маси відповідає атомна одиниця енергії:

$$1 \text{ а.о.м.} = 1{,}491 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} = 931{,}5 \text{ МеВ}.$$

Питома енергія зв'язку $E_{пит}$ – енергія зв'язку, що припадає на один нуклон. Вона характеризує стійкість (міцність) атомних ядер.

$$E_{пит} = \frac{E_{зв}}{A} \qquad (14.2.6)$$

Чим більше питома енергія зв'язку, тим стійкіше ядро.

14.3. Ядерні перетворення. Ядерні реакції. Виділення і поглинання енергії при ядерних реакціях.

Існують два типи ядерних перетворень:

− ядерні реакції;

− радіоактивність.

Ядерні реакції – це перетворення атомних ядер при їх взаємодії з елементарними частинками (у тому числі і з γ-квантами) або одного з одним.

Символічно ядерні реакції записуються в наступному вигляді:

$$X + \alpha \to Y + \beta \text{ або } X\left(\alpha, \beta\right)Y \qquad (14.3.1)$$

де X і Y – вихідне і кінцеве ядро; α і β – частинка, яка бомбардує і частинка що випускається в ядерній реакції.

У будь-якій ядерній реакції виконуються закони збереження електричних зарядів і масових чисел:

Сума зарядів ядер і частинок, які вступають в ядерну реакцію, дорівнює сумі зарядів продуктів реакції (ядер і частинок).

Сума масових чисел ядер і частинок, які вступають в ядерну реакцію, дорівнює сумі масових чисел продуктів реакції (ядер і частинок).

Ядерна реакція характеризується енергією ядерної реакції Q, що дорівнює різниці енергій кінцевої і вихідної пар в реакції:

$$Q = \left(\sum m_i - \sum m_k\right) \cdot c^2 \qquad (14.3.2)$$

$\sum m_i$ – сума мас частинок до реакції; $\sum m_k$ – сума мас частинок після реакції.

Ядерні реакції можуть бути:

а) *екзотермічними* (з виділенням тепла), при цьому $\sum m_i > \sum m_k$ (Q>0);

б) *ендотермічними* (з поглинанням тепла), при цьому $\sum m_i < \sum m_k$ (Q<0).

Якщо маси виразити в а.о.м., то енергія ядерної реакції обчислюється в МеВ (мегаелектрон-вольтах) за формулою:

$$Q = 931{,}15\left(\sum m_i - \sum m_k\right) \qquad (14.3.3)$$

Ядерні реакції відбуваються, коли частинки впритул наближуються до ядра і потрапляють у сферу дії ядерних сил. Це можливо, якщо частинкам надати велику кінетичну енергію. Для цього використовують прискорювачі елементарних частинок.

Радіоактивність – явище спонтанного (мимовільного) розпаду ядер, при якому утворюється нове ядро, і випускаються частинки. Ядро, яке розпадається, називається *материнським*, виникаюче ядро називається *дочірнім*.

14.4. Закон радіоактивного розпаду. Правила зміщення при радіоактивному розпаді.

При радіоактивному розпаді зменшується з часом число ядер, що не розпалися. Самовільний розпад ядер описується законом радіоактивного розпаду:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \qquad (14.4.1)$$

де N_0 – число ядер в даному об'ємі речовини у момент часу t=0; N – число ядер в тому ж об'ємі в момент часу t; λ – стала розпаду.

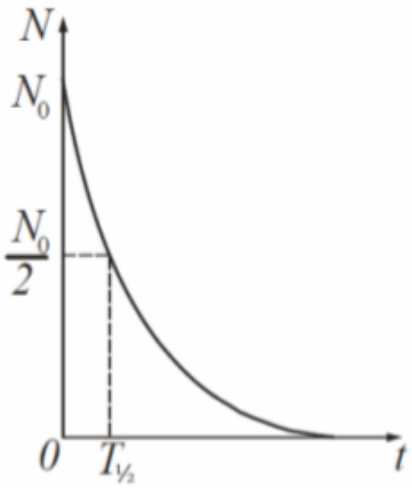


Рис. 14.4.1

Стала розпаду λ – це фізична величина, яка чисельно дорівнює частці ядер, які розпадаються за одиницю часу. Стала розпаду визначає швидкість радіоактивного розпаду.

Величина $\tau = \frac{1}{\lambda}$ називається *середньою тривалістю життя* (середній час життя) радіоактивного ізотопу. Для оцінки стійкості ядер зазвичай використовують не сталу розпаду, а величину, яка називається періодом напіврозпаду.

Період напіврозпаду ($T_{1/2}$) – час, протягом якого первинна кількість ядер даної радіоактивної речовини розпадається наполовину (рис. 14.4.1). Період напіврозпаду може мінятися в дуже широких межах (від доль секунд до тисяч років). Період напіврозпаду і стала розпаду зв'язані наступним співвідношенням:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0{,}693}{\lambda} \qquad (14.4.2)$$

Закон радіоактивного розпаду є статистичним законом. Статистичні закони можна застосовувати тільки до великої кількості ядер. Закон радіоактивного розпаду не відповідає на питання, яке саме ядро розпадеться, оскільки всі ядра нерозрізні і розпад даного ядра є випадковою подією, що має ту або іншу вірогідність.

До 1903 були відкриті кілька радіоактивних препаратів, які випромінюють α-, β-і γ-частинки: уран, торій, актиній, радій, полоній. Також було встановлено, що α-частинка – це ядро гелію (^4_2He), що має заряд ядра 2 та масу 4 а.о.м, β – електрон ($^0_{-1}e$) має заряд ядра -1 та масу приблизно 0 а.о.м.

Резерфорд разом із Фредеріком Содді (англійський радіохімік) відкрили правила зміщення при радіоактивному розпаді. За допомогою даного правила можна знайти ядро, яке утвориться внаслідок того чи іншого розпаду.

1) Правило зміщення Резерфорда-Содді для α розпаду:

$$^A_Z X \rightarrow ^{A-2}_{Z-2} Y + ^4_2 He \qquad (14.4.3)$$

α-розпад зменшує масове число на 4, а зарядове на 2, тобто дочірній елемент зміщується на дві клітки вліво в таблиці Д. І. Менделєєва. Тут виконується закон збереження електричного заряду і закон збереження маси. Наприклад, якщо радій має заряд 88 і масу 226, і випромінює α-частинку, то вийде елемент з зарядовим числом 86 і з масою 222 – радон (інертний газ).

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{222}_{86}Rn$$

2) Правило зміщення Резерфорда-Содді для β розпаду:

$$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A}_{Z+1}Y + ^{0}_{-1}e \qquad (14.4.4)$$

β-розпад не змінює масового числа, зарядове число збільшує на одиницю, тобто дочірній елемент зміщується на 1 клітку вправо. Наприклад:

$$^{3}_{1}H \rightarrow ^{3}_{2}He + ^{0}_{-1}e + \tilde{\nu}$$

Контрольні запитання до лекції №14.

1. Як знайти кількість електронів у атомі?
2. Які різновиди хімічних елементів називають ізотопами?
3. В чому полягає суть протонно-нейтронної будови атома?
4. Як записується рівняння Іваненко-Гейзенберга?
5. Що таке ядерні сили? Які властивості характерні для них?
6. Що називається енергією зв’язку?
7. Яка формула по’язує енергію і масу тіла?
8. Що таке дефект маси?
9. Що таке ядерні реакції?
10. Сформулюйте правило зміщення Резерфорда-Содді для α та β розпаду.

ЛЕКЦІЯ 15. ПРЕДМЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ. ОСНОВИ ПЕРЕДАЧІ І ПРИЙОМУ ІНФОРМАЦІЇ

15.1. Предмет та основні поняття радіоелектроніки.

Радіоелектроніка – галузь науки і техніки, що вивчає передачу і перетворення інформації за допомогою електромагнітних коливань радіочастотного діапазону і керованого руху електронів. Термін „радіо" походить від латинського слова „radiare", що означає „випромінювати промені", тобто стосовно до нашого радіоелектронному нагоди бездротову передачу інформації на відстані

Радіоелектроніка охоплює радіотехніку і електроніку, в т. ч. напівпровідникову електроніку, мікроелектроніку, квантову електроніку та ін. В основному радіоелектроніка „зобов'язана" успіхам розвитку радіотехніки.

Радіотехніка (від лат. radio – випускаю промені; від грец. techne – мистецтво, майстерність) є основним фундаментом радіоелектроніки, і тому часто під терміном „радіоелектроніка" розуміють радіотехніку. У технічному аспекті радіотехніка пов'язана з розробкою різноманітних систем, призначених для передачі і прийому інформації за допомогою електромагнітних коливань (у тому числі і оптичних).

До числа радіотехнічних систем відносяться:

• системи звукового та телевізійного радіомовлення;

• глобальні космічні (супутникові) системи радіозв'язку, телевізійного мовлення та радіонавігації;

• системи рухомого радіозв'язку з допомогою наземних засобів – стільникова, професійна (транкінговий), пейджинговий і бездротовий зв'язок;

• системи зв'язку з повітряними, рухливими наземними об'єктами, морськими надводними і підводними судами та інші види радіозв'язку;

• радіотехнічні системи комплексів радіолокаційної, протиповітряної та протиракетної оборони;

• метеорологічні та інформаційно-вимірювальні системи та системи різного моніторингу, в тому числі космічного;

• мультимедійні та інші системи.

Радіофізика – розділ фізики, в якому вивчаються фізичні основи радіотехніки. Найважливішими проблемами радіофізики є дослідження збудження і перетворення електричних сигналів, а також випромінювання і поширення електромагнітних коливань.

Розвиток радіотехніки безпосередньо пов'язаний зі створенням елементної бази, зокрема, з розробкою електронних приладів для систем передачі інформації на відстань за допомогою електромагнітних коливань. Подальший розвиток радіотехніки безперервно ставив завдання по створенню і впровадженню нових електронних елементів і вузлів, що призвело до появи самостійної галузі науки – електроніки.

Електроніка – наука про взаємодію заряджених частинок (електронів, іонів) з електромагнітними полями і методи створення електронних приладів і пристроїв, що використовуються в основному для передачі, зберігання та обробки інформації, виникла на початку XX ст. Спочатку розвивалася вакуумна електроніка; на її основі були створені електровакуумні прилади. Електроніка чітко розділилася на енергетичну або силову електроніку (потужні випрямлячі, інвертори і т. д.) і мікроелектроніку. Мікроелектроніка – розділ електроніки, пов'язаний зі створенням інтегральних схем – неподільних пристроїв, що виконують певні функції по перетворенні та обробці сигналів і мають високу щільність упаковки електрично з'єднаних елементів.

15.2. Основні принципи передачі і прийому інформації.

Бездротові канали зв'язку, що використовують в якості середовища передачі радіо- або інфрачервоні хвилі, не здійснюють фізичний контакт з передавальними і приймальними пристроями. На сьогоднішній день такі канали зв'язку є головною

альтернативою контактним способам передачі даних на основі телефонних ліній, витої пари і оптоволокна. Найбільш часто використовуються сучасні пристрої бездротової передачі даних – радіостанції, радіорелейні лінії зв'язку, системи супутникового зв'язку, системи стільникового зв'язку.

Система зв'язку – сукупність технічних засобів для передачі повідомлень від джерела до споживача. На рис. 1.2.1 наведена структурна схема системи радіозв'язку.

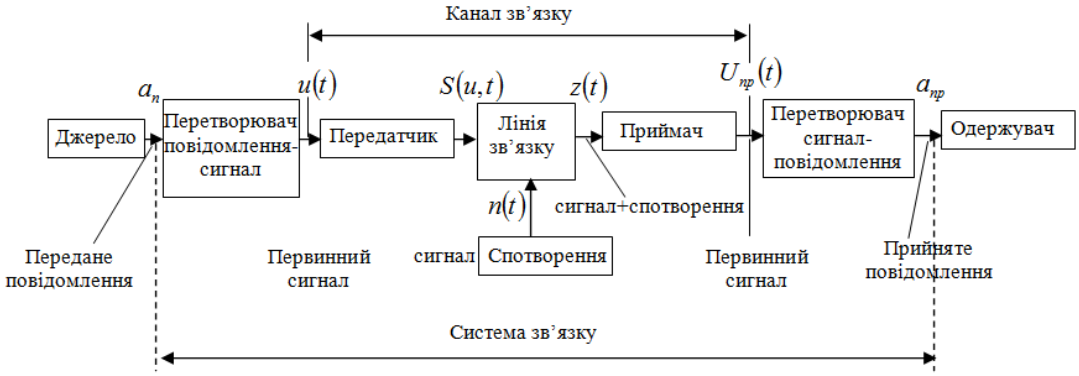


Рис. 15.2.1. Узагальнена структурна схема системи радіозв'язку

Джерело і одержувач повідомлень в системах зв'язку – людина або різного роду пристрої.

Перетворювач повідомлення в сигнал: в телефонії – це мікрофон, в телеграфії – телеграфний апарат, в телебаченні – передавальна трубка (ПЗС-матриця).

Передатчик перетворює первинний сигнал *u(t)* (зазвичай низькочастотний) у вторинний (високочастотний) сигнал *s(u,t)* на частоті, придатної для передачі по лінії зв'язку. Це здійснюється за допомогою модуляції, перетворення частоти і подальшого підсилення.

Лінією зв'язку (каналом зв'язку) називається фізичне середовище і сукупність апаратних засобів, що використовуються для передачі сигналів від

передавача до приймача. Фізичне середовище – це кабель, або хвилевід, в системах радіозв'язку – область простору, в якому поширюються електромагнітні хвилі від передавача до приймача. При передачі канальний сигнал *s(u,t)* може спотворюватися і на нього можуть накладатися перешкоди *n(t)*.

Приймач обробляє (підсилює, перетворює по частоті, фільтрує від позасмугових перешкод, демодулює) прийняте коливання *z(t)=s(t)+n(t)*, що представляє собою суму спотвореного сигналу *s(t)*, який пройшов і перешкоди *n(t)*, а перетворювач повідомлення в сигнал відновлює по ньому повідомлення $a_{пр}$, яке з деякою похибкою відображає передане повідомлення a_n.

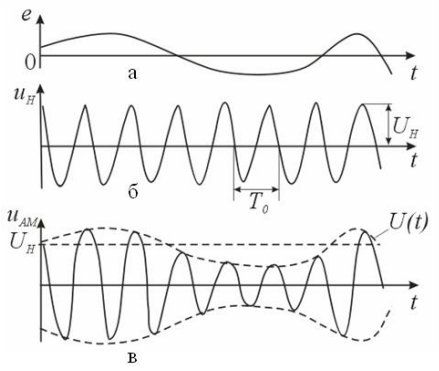


Рис. 15.2.2. Часові діаграми до процесу амплітудної модуляції: а – модулюючий сигнал; б – несуче коливання; в – АМ-сигнал

Сигнал – фізичний процес (або явище), що несе інформацію про стан будь-якого об'єкта спостереження. По своїй фізичній природі радіотехнічні сигнали бувають електричними, електромагнітними, оптичними, акустичними і ін. В радіотехніці, радіоелектроніці і системах зв'язку в основному використовують електричні (в останні роки і оптичні) сигнали. Фізичною величиною, що характеризує електричний сигнал, є напруга, рідше струм (іноді потужність).

Процес, в результаті якого один або кілька параметрів несучого коливання змінюється за законом переданого повідомлення, називається *модуляцією*. На рис. 15.2.2. показані часові діаграми до процесу амплітудної модуляції: а – модулюючий сигнал; б – несуче коливання; в – АМ-сигнал

Модульоване високочастотне коливання відносять до вторинних сигналів і називають радіосигналом.

Для несучого коливання залежність напруги від часу дається виразом:

$$u_н(t) = U_н \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = U_н \cos\psi(t) \qquad (15.2.1)$$

де $U_н$ – амплітуда сигналу у відсутності модуляції (амплітуда несучого коливання); ω_0 – кутова частота; φ_0 – початкова фаза; $\psi = \omega_0 t + \varphi_0$ – повна (миттєва) фаза.

При амплітудній модуляції огинаюча амплітудно-модульованого сигналу $U_H(t)$ співпадає за формою з модулюючим сигналом, тому вираз прийме вигляд:

$$u_{AM}(t) = U_н \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = [U_н + k_A e(t)]\cos(\omega_0 t + \varphi_0) \qquad (15.2.2)$$

Тут k_A – безрозмірний коефіцієнт пропорційності, такий, що завжди виконується нерівність $U_н(t) \geq 0$.

Передачу електромагнітного коливання на відстань здійснюють за допомогою антен, розмір яких залежить від довжини хвилі λ. Для мобільних телефонів розмір антени зазвичай дорівнює λ/4, а довжина хвилі визначається як:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

Де $c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$ – швидкість світла у вакуумі; ν – частота.

Розглянемо передачу низькочастотного сигналу (наприклад, звуку із середньою частотою $\nu = 1500\ Гц$). Для цього випадку $\frac{\lambda}{4} = \frac{1}{4} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{1500} = 50\ км$. Але якщо низькочастотний сигнал передається за допомогою несучої, наприклад, 1 500 МГц, розмір антени складе близько 5 см. Саме тому для передачі зазвичай використовуються несучі частоти, значення яких значно вище частоти самого сигналу.

Оскільки для передачі сигналу в радіотехніці використовуються радіохвилі, характер зв'язку істотно залежить від їх властивостей. По своїй фізичній природі радіохвилі відносяться до електромагнітних поперечних хвиль і на шкалі електромагнітних хвиль займають ділянку від 100 км до 0,1 мм. У таблиці 15.2.1 наведена шкала, а у таблиці 15.2.2 класифікація електромагнітних хвиль.

Таблиця 15.2.1.

Шкала електромагнітних хвиль

Довжина хвилі	100 км	0,1 мм	760 нм	380 нм	3 нм	1 пм
	Радіохвилі	ІЧ-випромін. 3000 ГГц	Видиме світло 400 ТГц	УФ випромін. 800 ТГц	Рентгенівська обл. 100 ПГц	Гама Випромін. 300 ЕГц (ексагерц 10^{18})
	Радіотехніка	Оптика			Квантова фізика	

Таблиця 15.2.2.

Класифікація електромагнітних хвиль

Назва	Діапазон довжин хвиль	Діапазон частот	Приклади використання
Декамегаметрові (крайньо низькі частоти)	10^5-10^4 км	3-30 Гц	Підводний і службовий зв'язок
Мегаметрові (наднизькі частоти)	10^4-10^3 км	30-300 Гц	Підводний і службовий зв'язок
Гектокілометрові (інфранизькі частоти)	10^3-10^2 км	300-3000 Гц	Підводний і службовий зв'язок
Міріаметрові (наддовгі хвилі)	100-10 км	3-30 кГц	Далека радіонавігація. Підводний і службовий зв'язок
Кілометрові (довгі хвилі)	10-1 км	30-300 кГц	Радіомовлення
Гектометрові (середні хвилі)	1000-100 м	0,3-3 МГц	Радіомовлення
Декаметрові (короткі хвилі)	100-10 м	3-30 МГц	Радіомовлення. Радіозв'язок
Метрові (ультракороткі хвилі)	10-1 м	30-300 МГц	Телевізійне мовлення. Мобільний і зв'язок з літаками
Дециметрові	1-0,1 м	0,3-3 ГГц	Телевізійне мовлення. Космічний радіозв'язок і радіонавігація. Радіолокація
Сантиметрові	10-1 см	3-30 ГГц	Космічний радіозв'язок. Радіолокація. Радіонавігація. Радіоастрономія
Міліметрові	10-1 мм	30-3000 ГГц	Космічний радіозв'язок. Радіолокація. Радіоастрономія

Основні закони поширення радіохвиль слідують із системи рівнянь Максвелла:

$$rot\,\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \qquad (15.2.1)$$

де $\vec{H}$ – напруженість магнітного поля, $\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$; $\vec{j}$ – струм провідності, $\vec{j} = \sigma\vec{E}$,

Величина $\frac{\partial\vec{D}}{\partial t}$ називається струмом зсуву, $\vec{D} = \varepsilon\varepsilon\vec{E}$. При цьому ε , μ , σ – електрична, магнітна проникність середовища і її питома провідність.

Фізичний зміст рівняння 15.2.1: *змінне магнітне поле породжується струмами провідності та змінним електричним полем.*

$$rot\,\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \qquad (15.2.2)$$

Фізичний зміст рівняння 15.2.2: *змінне магнітне поле породжує змінне вихрове електричне.*

$$\text{div}\ \vec{B} = 0 \qquad (15.2.3)$$

Фізичний зміст рівняння 15.2.3:

1. Магнітних зарядів в природі не існує.

2. Не існує потенціального магнітного поля.

$$\text{div}\ \vec{D} = \rho \qquad (15.2.4)$$

де ρ – об'ємна щільність заряду.

Фізичний зміст рівняння 15.2.4: *електричний заряд – джерело потенціального електричного поля.*

Відповідно до викладеного розрізняють наступні основні випадки поширення радіохвиль.

1. Прямолінійне поширення $\varepsilon(x,y,z,t) = const$ і $\mu(x,y,z,t) = const$.

2. Рефракція (огинання перешкод, розмір яких багато більший довжини хвилі) $\varepsilon = f(x,y,z,t)$ і $\mu = f(x,y,z,t)$.

3. Заломлення і відбивання $\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2$, $\mu_1 \neq \mu_2$.

4. Повне внутрішнє відбивання.

5. Дифракція (огинання перешкод порівнянних за розмірами з довжиною хвилі).

6. Згасання (зменшення енергії електромагнітної хвилі через явищ розсіювання, поглинання, конвекції).

Контрольні запитання до лекції № 15.

1. Дайте визначення поняттям „радіоелектроніка", „радіотехніка", „радіофізика" „електроніка".
2. Що відноситься до числа радіотехнічних систем?
3. Що таке електричний сигнал та які його основні параметри?
4. Що називають модуляцією? Які види модуляції ви знаєте?
5. Поясніть, для чого потрібно здійснювати модуляцію сигналу.
6. Поясніть основні принципи передачі і прийому інформації.
7. Зобразіть узагальнену структурну схему системи радіозв'язку.
8. Як класифікують електромагнітні хвилі?
9. Запишіть рівняння Максвела. Що вони описують?
10. Який фізичний зміст кожного з рівнянь Максвела?

ЛЕКЦІЯ 16. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ

16.1. Напівпровідникові матеріали.

Всі тверді речовини за своїми електричними властивостями розділяють на провідники, напівпровідники та діелектрики. До напівпровідників відносяться речовини, які за електричними властивостями займають проміжне місце між провідниками і діелектриками. Питома електропровідність напівпровідників $\sigma = 10^{2}...10^{-8}\,\frac{См}{м}$ (у діелектриків $\sigma < 10^{-12}\,\frac{См}{м}$, у металів $\sigma = 10^{3}...10^{4}\,\frac{См}{м}$).

Другою характерною особливістю напівпровідників є сильна залежність їх електропровідності від температури, концентрації домішок, від впливу світлового та іонізуючого випромінювання, а також від інших енергетичних впливів. Відзначні ознаки напівпровідників порівняно з провідниками і діелектриками зумовлені відмінністю в механізмі їх електричної провідності.

Із усієї різноманітності напівпровідникових матеріалів в радіоелектроніці для створення напівпровідникових приладів використовуються переважно германій і кремній. Обидва вони елементи четвертої групи періодичної системи а, отже, мають по чотири валентні електрони. В просторі атоми цих речовин розташовані у вершинах правильних тетраедрів і зв'язані між собою ковалентними зв'язками. Кожен атом в них пов'язаний з сусіднім двома електронами – по одному від кожного атома.

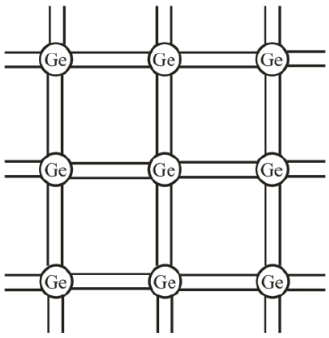


Рис. 16.1.1. Кристалічна решітка кристалу германію

Схематичне зображення кристала германію на площині показано на рисунку 16.1.1.

У ідеальній кристалічній гратці напівпровідника при температурі абсолютного нуля всі електрони зв'язані з атомами і речовина виявляє властивості ідеального діелектрика. Проте електропровідність в кристалі германію може виникнути, якщо порушити зв'язки між атомами. Наприклад, світло чи тепло можуть надати деяким електронам енергію, достатню для відриву їх від атомів. При цьому в кристалі з'являться вільні електрони, які переміщаються невпорядковано, подібно до молекул газу.

Якщо такий кристал помістити в електричне поле, то вільні електрони будуть переміщатися у напрямку сил поля і в кристалі виникне електричний струм. Електропровідність, що здійснюється вільними електронами, називається електронною провідністю напівпровідника. Електронна провідність називається *n*-провідністю.

При відриві електронів від атомів германію в останніх утворюються вільні місця, які можуть бути зайняті іншими електронами. Недостача в якомусь із атомів кристалічної гратки електрона еквівалентна наявності тут рівного за величиною зайвого позитивного заряду. У фізиці напівпровідників таку електронну вакансію називають „*діркою*".

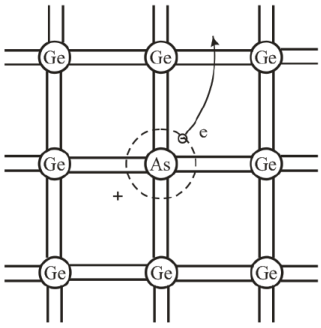


Рис. 16.1.2. Виникнення вільного електрона в кристалі напівпровідника *n*-типу

В звичайних умовах, тобто при кімнатній температурі, процесс виникнення пари електрон-дірка і рекомбінація відбуваються безперервно. В результаті встановлюється динамічна рівновага, при якій в чистому напівпровіднику концентрація електронів рівна концентрації дірок. Наявність носіїв зарядів в напівпровіднику пояснює його провідність. Провідність чистого напівпровідника, яка обумовлена електронами і дірками, що виникають тільки в результаті розриву

парноелектронних зв'язків, називається власною провідністю, а напівпровідники у яких концентрація дірок дорівнює концентрації вільних електронів називаються *власними* напівпровідниками.

Електропровідність напівпровідників різко зростає, якщо до них добавити домішки у малих, але в строго визначених кількостях. Наприклад, якщо в кристалічну гратку германію упровадити атоми сусіднього з ним у таблиці Менделеєва п'ятивалентного миш'яку, то вони утворять з сусідніми атомами такі ж зв'язки, як і германій, причому для цього буде задіяно лише чотири електрони, а п'ятий виявиться зайвим, слабко зв'язаним і може бути легко відірваним від атома (рис. 16.1.2). Домішки, які подібно до миш'яку, віддають свої електрони, називають *електронними* або *донорними* домішками, і всі величини, що до них відносяться, позначають індексом „*n*" (від слова *negative*, негативний, тобто від'ємний, оскільки створені донорною домішкою вільні заряди – електрони – мають від'ємний знак).

Атом миш'яку, що втратив один електрон, перетворюється на позитивний іон, який виявляється нерухомим, оскільки він міцно утримується у вузлі кристалічної решітки парноелектронними зв'язками. Рухомі носії зарядів, концентрація яких в даному напівпровіднику переважає, називаються *основними* носіями зарядів. У напівпровіднику з донорними домішками електрони є основними носіями зарядів, а дірки – не основними.

Іншу домішкову провідність набуде германій, якщо у нього ввести атоми трьохвалентних елементів, наприклад, індій. Оскільки атоми індію мають три валентних електрони, то при утворенні зв'язків з атомами германію один із чотирьох можливих зв'язків виявиться неповним. В результаті теплового руху електрон одного з сусідніх атомів германію може перейти в незаповнений зв'язок атома індію. В атомі германію з'явиться один незаповнений зв'язок – дірка (рис. 16.1.3). Захоплений атомом індію, четвертий електрон утворює парноелектронний зв'язок і міцно утримується атомом індію. Атом індію стає при цьому нерухомим негативним іоном.

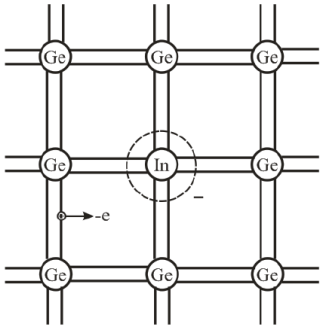


Рис. 16.1.3. Виникнення дірки в кристалі напівпровідника *p*-типу

Такі домішки називаються дірковими або акцепторним. Всі величини, що стосуються до акцепторних домішок, позначають індексом "*p*" (від слова „positive"), оскільки вони утворюють тільки позитивні носії заряду – дірки. Основними носіями зарядів в напівпровіднику з акцепторною домішкою є дірки, а не основними – електрони.

Направлений рух рухомих носіїв зарядів під впливом електричного поля називають дрейфом (дрейфовий рух), а під впливом різниці концентрацій носіїв зарядів – дифузією (дифузійний рух). Нерівномірність концентрації зарядів в якій-небудь частині напівпровідника може виникнути під дією світла, тепла електричного поля і ін. Залежно від характеру руху носіїв зарядів розрізняють відповідно дрейфовий і дифузійний струми в напівпровідниках.

16.2. Електронно-дірковий перехід (*p-n* перехід).

Робота переважної кількості напівпровідникових приладів грунтується на явищах, які виникають при контакті двох монокристалічних напівпровідників з різними типами провідності. Такий контакт *p*- і *n*- напівпровідників називають *p-n переходом.* Він має ряд цінних властивостей, використання яких і обумовлює широчезний спектр можливостей напівпровідникових приладів.

Розглянемо процес, що утворюється у місці дотику напівпровідника, що має електронну *n*-провідність з напівпровідником, що має *p*-провідність.

Кожному рухомому позитивному носію заряду в області *p* (дірці) відповідає негативно заряджений іон нерухомої акцепторної домішки, що знаходиться у вузлі кристалічної решітки, а в області *n* кожному вільному електрону відповідає позитивно заряджений іон донорної домішки, в результаті чого весь монокристал залишається електрично нейтральним.

Вільні носії електричних зарядів під дією градієнта концентрації починають переміщатися з місць з великою концентрацією в місця з меншою концентрацією. Так, дірки будуть дифундувати з області *p* в область *n*, а електрони, навпаки, з області *n* в область *p* (рис. 16.2.1). Це спрямоване назустріч один одному переміщення електричних зарядів утворює дифузійний струм *p*-*n*-переходу. Але як тільки дірка з області *p* перейде в область *n*, вона виявляється в оточенні електронів, які є основними носіями електричних зарядів в області *n*. Тому є велика ймовірність того, що відбудеться явище рекомбінації, в результаті якої не буде ні дірки, ні електрона, а залишиться електрично нейтральний атом напівпровідника. Але якщо раніше позитивний електричний заряд кожної дірки компенсувався негативним зарядом іона акцепторной домішки в області *p*, а заряд електрона – позитивним зарядом іона донорної домішки в області *n*, то після рекомбінації дірки і електрона електричні заряди нерухомих іонів домішок, що породили цю дірку і електрон, залишаться не скомпенсовані. І, в першу чергу, не скомпенсовані заряди іонів домішок виявляють себе поблизу межі розділу, де утворюється шар просторових зарядів, розділених вузьким проміжком δ. Між цими зарядами виникає електричне поле з напруженістю $\vec{E}$, яке називають *полем потенціального бар'єру*, а різниця потенціалів на межі поділу двох зон, що обумовлюють це поле, називають *контактною різницею потенціалів* $\Delta\varphi_k$ (рис. 16.2.2).

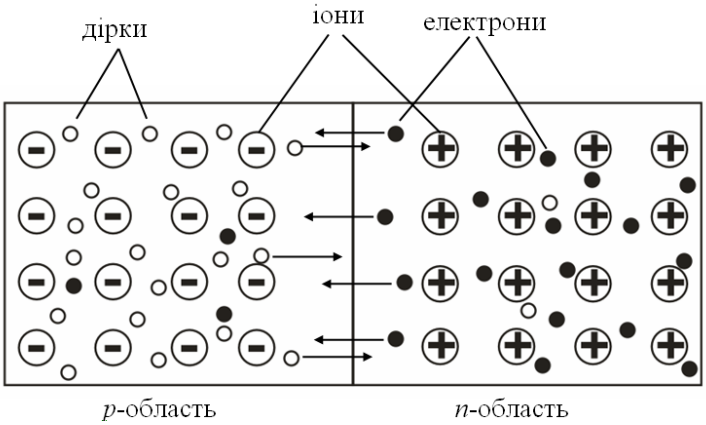


Рис. 16.2.1. Початковий момент утворення *p*-*n* переходу

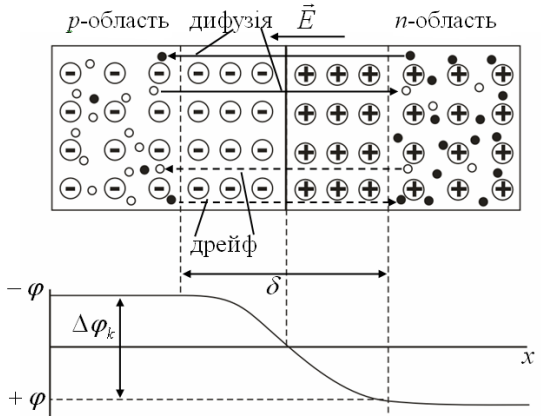


Рис. 16.2.2. Електронно-дірковий перехід при відсутності зовнішньої напруги

Це електричне поле видаляє носії зарядів з перехідного шару: електрони в *n*-область, а дірки в *p*-область. Внаслідок цього перехідний шар δ збіднюється носіями і

набуває властивостей діелектрика. Глибина проникнення поля у напівпровідник залежить від його провідності: чим вона менша, тим більшою буде глибина. Тому, коли ступінь легування *p*- і *n*- областей неоднакова, збіднений носіями заряду шар утворюється переважно в напівпровіднику, котрий зазнав слабшого легування.

При намаганні носіїв проникнути в „чужу" область їм доводиться долати потенціальний бар'єр досить значної висоти. Тому, хоч деякий обмін зарядами між *p*- і *n*-областями і існує, він дуже незначний.

При відсутності зовнішнього електричного поля встановлюється динамічна рівновага між потоками основних і неосновних носіїв електричних зарядів, тобто між дифузійною і дрейфовою складовими струму *p*-*n*-переходу, тому що ці складові спрямовані назустріч один одному.

Потенціальна діаграма *p*-*n*-переходу зображена на рис. 16.2.2, причому за нульовий потенціал прийнятий потенціал на межі поділу областей. Контактна різниця потенціалів утворює на межі розділу потенціальний бар'єр з висотою $\Delta\varphi_k$. На діаграмі зображено потенціальний бар'єр для електронів, які прагнуть за рахунок дифузії переміщатися справа наліво (з області *n* в область *p*). Якщо відкласти вгору позитивний потенціал, то можна отримати зображення потенціального бар'єру для дірок, які дифундують зліва направо (з області *p* в область *n*).

Справа змінюється, якщо до переходу прикладена зовнішня напруга $U_{зв}$ так, що до області *p*- типу подається „+", а до області *n*- типу – „-" (рис. 16.2.3). Таке підключення називають прямим включенням *p*-*n*-переходу (або прямим зміщенням *p*-*n*-переходу). Напруженість електричного поля зовнішнього джерела $E_{зв}$ буде спрямована назустріч напруженості поля потенціального бар'єру E і, отже, призведе до зниження результуючої напруженості $E_{рез}$:

$$E_{рез} = E - E_{зв} \qquad (16.2.1)$$

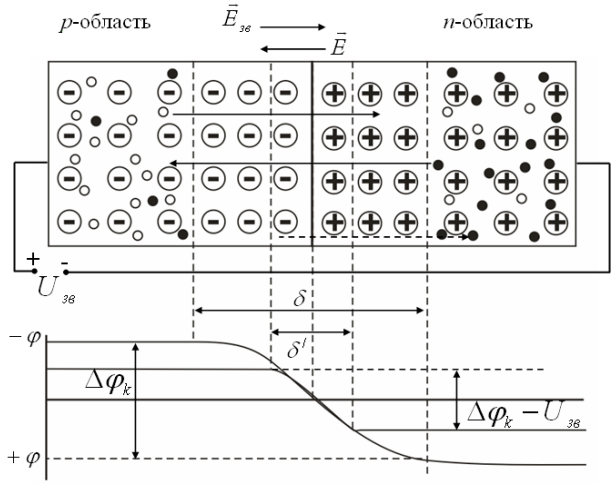


Рис. 16.2.3. Пряме зміщення *p*-*n*-переходу

Це призводить до зниження висоти потенціального бар'єру і збільшення кількості основних носіїв, що дифундують через межу розділу в сусідню область, які утворюють так званий прямий струм I *p*-*n*-переходу. При цьому внаслідок зменшення гальмуючої дії поля потенціального бар'єру на основні носії, ширина запірного шару δ зменшується ($\delta' < \delta$) і, відповідно, зменшується його опір.

У міру збільшення зовнішньої напруги прямий струм *p*-*n*-переходу зростає. Основні носії після переходу межі розділу стають неосновними в протилежній частині напівпровідника і, заглибившись в неї, рекомбінують з основними носіями цієї області. Але, поки підключене зовнішнє джерело, струм через перехід підтримується

безперервним надходженням електронів із зовнішнього кола в *n*-область і видходом їх з *p*-області в зовнішнє коло, завдяки чому відновлюється концентрація дірок в *p*-області.

Внесок в струм I носіїв різного типу обумовлений насамперед їх концентрацією. Якщо *p*-область легована значно сильніше, ніж *n*-область, то струм I створюється переважно дірками. І навпаки, якщо сильніше легована *n*-область, основний внесок в струм дадуть електрони.

Таким чином, основний потік зарядів через перехід визначається сильніше легованою областю; її називають *емітером*. Слабше леговану область називають базою. Процес введення сторонніх носіїв (наприклад, дірок у *n*- область) називають *інжекцією*. Інжектовані заряди існуватимуть у області інжекції як неосновні носії, поки вони не прорекомбінують там з основним носіями.

При протилежній полярності зовнішньої напруги висота потенціального бар'єру зростає, а товщина його збільшується, в результаті чого рух основних носіїв через перехід практично припиняється. Електричний струм, що існує при такій зворотній полярності обумовлюється лише неосновними носіями, які завжди у невеликій кількості присутні у напівпровіднику. Для них поле у переході є прискорюючим і тому будь-який неосновний носій, який при своєму тепловому русі потрапить на межу збідненого шару буде обов'язково втягнутим у цей шар і перетне межу *p*- і *n*- переходу. Таке усмоктування неосновних носіїв в збіднений шар називають *екстракцією*.

Контрольні запитання до лекції № 16.

1. Які матеріали називаються напівпровідниками?
2. Назвіть характерні особливості напівпровідників.
3. Які напівпровідники називаються власними?
4. Перелічіть носії заряду, які забезпечують електропровідність напівпровідників.
5. Які зовнішні фактори, які впливають на електропровідність напівпровідників?
6. Що таке *n* та *p* провідність напівпровідників?
7. Які домішки називаються донорними, а які акцепторними?
8. Що таке поле потенціального бар'єру і як воно утворюється?
9. Поясніть суть дифузійної та дрейфової складової струму *p*-*n*-переходу.
10. Які області називаються емітером, базою та колектором?

ЛЕКЦІЯ 17. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ

17.1. Загальні відомості про діоди.

Напівпровідниковий діод – це двохполюсний електроперетворювальний напівпровідниковий прилад, що має один *p-n* перехід і два електроди: катод та анод.

Всі напівпровідникові діоди можна розділити на дві групи: *випрямні і спеціальні*. Випрямні діоди призначені для випрямлення змінного струму. Залежно від частоти і форми змінної нанапруги вони діляться на високочастотні, низькочастотні та імпульсні. У спеціальних типах напівпровідникових діодів використовують різні властивості *p-n*-переходу: явище пробою, бар'єрну ємність переходу і т. д.

Спрощена структура діода показана на рис. 17.1.1, а, а його умовне графічне зображення – на рис. 17.1.1, б.

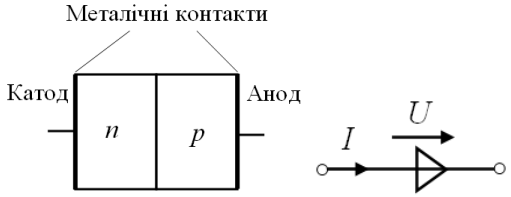


Рис. 17.1.1. Спрощена структура (а) та схематичне зображення (б) діода

Електрод діода, який підключений до *p*-області, називають анодом (А), а електрод, що підключений до *n*-області – катодом (К). Якщо анод позитивний по відношенню до катода, то на діод подано пряме зміщення; струм діода при цьому називають *прямим*. При зворотному зсуві катод більш позитивний, ніж анод. Зворотний струм при цьому обмежений малим струмом насичення.

Як правило, напівпровідникові діоди виконують на основі несиметричних *p-n*-переходів. У цьому випадку в одній з областей концентрація домішки, що визначає тид провідності, значно більше, ніж в іншій області. Область з високою концентрацією домішки називають *емітером*. Функції емітера може виконувати як катод, так і анод. Область з низькою концентрацією домішки називають *базою*. База має значно більший об'ємний опір, ніж емітер.

Напівпровідникові діоди класифікуються:

1) за призначенням: випрямні, високочастотні і надвисокочастотні (ВЧ- і НВЧ-діоди), імпульсні, напівпровідникові стабілітрони, тунельні, обернені, варикапи та ін.;

2) за конструктивно – технологічними особливостями: площинні і точкові;

3) за типом вихідного матеріалу: германієві, кремнієві, арсеніде-галієві та ін.

Точкові діоди мають дуже малу площу *p-n*-переходу, причому лінійні розміри її менше товщини *p-n*-переходу. У таких діодах використовується пластинка германію або кремнію з електропровідністю *n*-типу, завтовшки 0,1…0,6 мм і площею 0,17...1,17 мм^2. З пластинкою стикається загострена проволока (голка) з нанесеною на неї домішкою (рис. 17.1.2). При цьому з голки в основний напівпровідник дифундують домішки, які створюють область з іншим типом електропровідності. Таким чином, біля голки утворюється мініатюрний *p-n*-перехід напівсферичної форми.

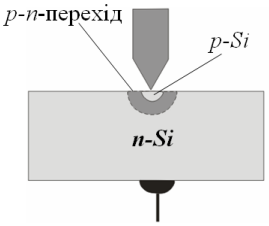


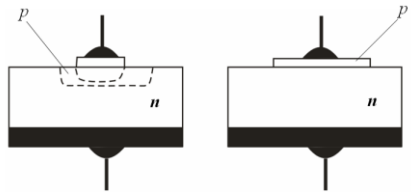
Рис. 17.1.2. Структура точкового діода

Завдяки малій площі *p-n*-переходу бар'єрна ємність точкових діодів дуже незначна, що дозволяє використовувати їх на високих і надвисоких частотах.

Площинними називають такі діоди, у яких розміри, що визначають площу *p-n*-переходу, значно більше його ширини. У таких діодівплоща *p-n*-переходу може становити від часток квадратного міліметра до десятків квадратних сантиметрів.

Площинні діоди виготовляються методами сплаву (вплавлення) або дифузії. У пластинку германію *n*-типу вплавляють при температурі біля 1700 °С краплю індію рис. 17.1.3, а, яка (сплавляючись з германієм) утворює шар германію *p*-типу. Область з електропровідністю *p*-типу має вищу концентрацію домішок, ніж основна пластинка, і тому є емітером. До основної пластинки германію і до індію припаюють вивідні проволоки, зазвичай з нікелю. Якщо вихідним матеріалом є германій *p*-типу, то в нього вплавляють сурму і тоді виходить емітерна область *n*-типу.

Дифузійний метод виготовлення *p*-*n*-переходу заснований на тому, що атоми домішок дифундують в основний напівпровідник (рис. 17.1.3, б). Для створення *p*-шару використовують дифузію акцепторного елементу (бору або алюмінію для кремнію, індію для германію) через поверхню вихідного матеріалу.



а б

Рис. 17.1.3. Будова площинних діодів: а – виготовлений сплавним методом; б – виготовлений дифузійним методом

Найбільш поширеними є германієві та кремнієві діоди. Останні мають ряд переваг у порівнянні з германієвими, оскільки фізичні властивості кремнію дозволяють одержати *p*-*n*-перехід з великою величиною допустимої зворотної напруги: для кремнієвих діодів ця напруга складає 1000…11700 В, а для германієвих – 100…400 В. Крім того ці діоди мають різні діапазони робочих температур: кремнієві від -60 до +(120…1170) ^{0}С, а германієві від -60 до +(70…817) ^{0}С.

Напівпровідникові діоди мають позначення, що складається із чотирьох символів. Перший означає вихідний матеріал, з якого виготовлений *p*-*n*-перехід: Г або 1 – германій, К або 2 – кремній, А або 3 – арсенід галію. Літерні позначення відносяться до приладів, що працюють при нормальній температурі, а цифрові – при підвищеній (70 ^{0}С для германієвих і 120 ^{0}С для кремнієвих).

Другий символ (літера) вказує на тип напівпровідникового діода: Д – випрямні, універсальні, імпульсні діоди; Ц – випрямні стовпи і блоки; А – надвисокочастотні діоди; С – стабілітрони і т.д.

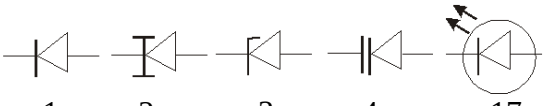


Рис. 17.1.4. Позначення діодів: 1 – випрямляючий діод; 2 – тунельний діод; 3 – стабілітрон; 4 – варикап; 17 – випромінюючий діод (світлодіод)

Третій символ – число, що характеризуєпризначення або електричні властивості діода.

Четвертий символ позначення вказує на модифікацію приладу.

Наприклад, 2Д1702А – кремнієвий імпульсний діод, різновид типу А; 1И302Г – германієвий тунельний перемикаючий діод, різновид типу Г.

В загальному напівпровідниковий p-n перехід є основою для побудови діодів різного призначення. На рис. 17.1.4 приведені типи широко використовуємих діодів на базі p-n переходу.

17.2. Характеристики різних типів діодів.

Випрамляючі діоди. Випряляючі діоди – це діоди, призначені для перетворення змінного струму в постійний, до швидкодії, ємності *p*-*n* переходу і стабільності параметрів яких не пред'являють спеціальних вимог. Для випрямляючих діодів характерно, що вони мають малі опори у провідному стані і дозволяють пропускати великі струми. Через велику площі *p*-*n* переходу бар'єрна ємність їх велика і досягає значень десятків мікрофарад.

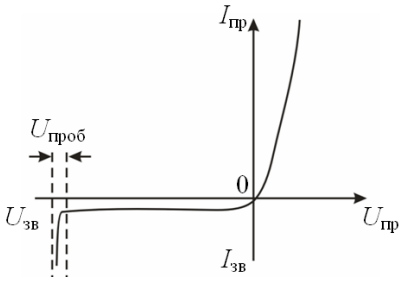


Рис. 17.2.1. Вольт-амперна характеристика діода

Робота напівпровідникового випрямляючого діода базується на властивостях електронно-діркового переходу пропускати струм тільки в одному напрямку. Основною характеристикою напівпровідникових діодів є вольт-амперна характеристика (ВАХ) (рис. 17.2.1). З рисунка видно, що електронно-дірковий перехід являється нелінійним елементом, опір якого сильно залежить від величини і полярності прикладної напруги. З підвищенням прямої напруги опір електронно-діркового переходу зменшується. При зміні полярності прикладеної напруги опір електронно-діркового переходу різко зростає. На нелінійних властивостях електронно-діркового переходу ґрунтується робота напівпровідникових діодів, які використовуються для випрямлення змінного струму.

Подальше підвищення зворотної напруги призводить до електричного пробою електронно-діркового переходу, при якому зворотній струм різко зростає. При цьому відбувається незворотнє пошкодження діоду.

Тепловий пробій виникає в результаті розігріву *p*-*n*-переходу, коли кількість теплоти, яка виділяється струмом в ньому, перевищує кількість теплоти, яка від цього переходу відводиться. При розігріві *p*-*n*-переходу відбувається інтенсивна генерація електронно-діркових пар та збільшення зворотнього струму через перехід Це, в свою чергу, призводить до подальшого підвищення температури і збільшення зворотнього струму. В результаті струм через *p*-*n*-перехід лавиноподібно зростає і настає тепловий пробій. Випрямляючі діоди конструктивно виготовляють так, щоб до них могли прикріплятись тепловідвідні радіатори.

Основні параметри випрямляючих діодів.

$I_{пр.макс.}$ – найбільший прямий струм, що може тривалий час проходити через діод, не порушуючи його нормальної роботи;

$U_{зв.доп.}$ – допустима зворотня напруга – найбільше значення напруги, яку можна прикладати до діода в зворотньому напрямку протягом тривалого часу без порушення його нормальної роботи;

$U_{пр.}$ – значення постійної напруги на діоді при заданому прямому струмі;

$I_{зв.}$ – значення постійного струму, що протікає через діод в зворотньому напрямку при заданій зворотній напрузі.

Явище електричного пробою, неприпустиме для випрямляючих діодів, знаходить корисне застосування в кремнієвих стабілітронах.

Стабілітрони. Стабілітроном називається напівпровідниковий діод, вольт-амперна характеристика якого має область різкої залежності струму від напруги на зворотній ділянці вольт-амперної характеристики.

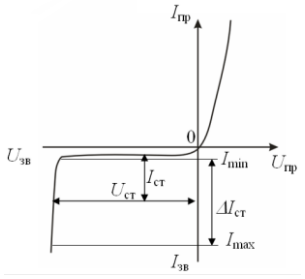


Рис. 17.2.2. Вольт-амперна характеристика стабілітрона

Стабілітрони використовують для роботи при напрузі, що перевищують напругу пробою діода. У цьому випадку область зворотних напруг, при якій настає пробій, називається областю стабілізації. Коли зворотна напруга досить велика, щоб викликати пробій стабілітрона, через нього тече високий зворотний струм. До настання пробою зворотний струм невеликий, після різко зростає. Це відбувається тому, що опір стабілітрона зменшується при збільшенні зворотної напруги.

Стабілітрони випускають з певною напругою пробою, яку називають напругою стабілізації. На рис. 17.2.2 показана вольт-амперная характеристика стабілітрона: де $U_{ст}$ – номінальна напруга стабілізації, $I_{ст}$ – номінальний струм стабілізації. Номінальний означає

нормальний параметр, при якому можлива довготривала робота радіоелемента. I_{max} та I_{min} відповідно максимальний та мінімальний струм стабілітрона (струм, який тече через стабілітрон при його роботі).

На рис. 17.2.3 показане типове регулююче коло із стабілітроном. Стабілітрон VD з'єднаний послідовно з резистором R. Резистор обумовлює проходження через стабілітрон робочого струму (при якому стабілітрон працює в режимі пробою (стабілізації)). Вхідна постійна напруга $U_{ВХ}$ повинна бути вище напруги стабілізації U_C стабілітрона. Падіння напруги на стабілітроні дорівнює напрузі стабілізації стабілітрона: $U_{ВИХ}=U_C$. Падіння напруги на резисторі дорівнює різниці вхідної напруги і напруги стабілізації: $U_R=U_{ВХ}-U_C$.

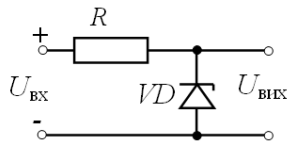


Рис. 17.2.3. Стабілізація напруги

Вхідна напруга може збільшуватися або зменшуватися, що обумовлює відповідне збільшення або зменшення струму через стабілітрон. Коли стабілітрон працює при напрузі стабілізації (в області пробою), при збільшенні вхідної напруги через нього може йти великий струм. Однак напруга на стабілітроні залишиться незмінною. Стабілітрон здійснює протидію збільшенню вхідної напруги, тому що при збільшенні струму його питомий опір падає, що дозволяє вихідній напрузі на стабілітроні залишатися постійною при змінах вхідної напруги. Зміна вхідної напруги проявляється тільки в зміні спаду напруги на послідовно включеному резисторі. Сума спадів напруги на цьому резисторі і стабілітрон дорівнює вхідній напрузі. Вихідна напруга знімається зі стабілітрона і може бути збільшена або зменшена шляхом заміни стабілітрона і включеного послідовно з ним резистора.

Основні параметри стабілітрона.

Номінальна напруга стабілізації $U_{ст\ ном}$ – напруга на стабілітроні в робочому режимі (при заданому струмі стабілізації).

Мінімальний струм стабілізації $I_{ст.min}$ – найменше значення струму стабілізації, при якому режим пробою стійкий.

Максимально допустимий струм стабілізації $I_{ст.max}$ – найбільший струм стабілізації, при якому нагрів стабілітронів не виходить за допустимі межі.

Диференціальний опір $r_{диф}$ – відношення приросту напруги стабілізації до приросту струму стабілізації, що викликає його: $r_{диф}=\dfrac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}}$.

Температурний коефіцієнт напруги стабілізації – відношення відносної зміни напруги стабілізації до абсолютної зміни тимператури навколишнього середовища: $\alpha_{ст}=\dfrac{\Delta U_{ст}}{U_{ст}\Delta T}$.

Тунельні діоди. Тунельними діодами називаються напівпровідникові діоди, *p-n*-перехід яких утворюється з двох вироджених напівпровідників. Виродженими називають напівпровідники з високою концентрацією носіїв заряду порядку 10^{19} см$^{-3}$ і більше. В 19178 році було встановлено, що такі напівпровідники мають аномальну ВАХ. Аномальний хід характеристики сильно легованих *p-n* структур зумовлений, як було встановлено, тунельним ефектом. Як відомо, частинка, що має енергію, недостатню для проходження через потенціальний бар'єр, може все ж таки пройти крізь нього, якщо з другої сторони цього бар'єру є такий же вільний енергетичний рівень, який займала частинка перед бар'єром. Це явище називається тунельним ефектом. В квантовій механіці показується, що ймовірність тунельного переходу тим вища, чим вужчий потенціальний бар'єр і чим менша його висота. Тунельний перехід здійснюється електронами без витрат енергії.

За невеликої прямої напруги, прикладеної до тунельного діода, починається тунельний перехід електронів з *n*-області в *p*-область і через *p-n*- перехід потече

тунельний струм. За деякого значення прямої напруги на тунельному діоді тунельний струм буде максимальним. Подальше збільшення прямої напруги на діоді призведе до зменшення тунельного струму, оскільки буде зменшуватись кількість електронів, здатних тунелювати з *n*-області в *p*-область.

За деякої прямої напруги тунелювання електронів припиниться. У цьому разі струм буде мінімальним і визначатиметься лише переходом носіїв заряду через потенціальний бар'єр, який значно понизився (тобто, як у звичайному діоді, за рахунок інжекції носіїв заряду). З подальшим збільшенням прямої напруги, у зв'язку із зменшенням висоти потенціального бар'єра інжекція носіїв заряду через *p-n*-перехід, і, відповідно, струм діода, будуть зростати.

За зворотної напруги в тунельному діоді знову виникнуть умови для тунелювання електронів. При збільшенні зворотної напруги тунелювання електронів з *p*-області в *n*-область, а також і зворотний струм тунельного діода зростатимуть.

ВАХ тунельного діода показана на рис. 17.2.4. Її особливістю є те, що вона має спадну ділянку АВ, на якій диференційний опір діода є від'ємним.

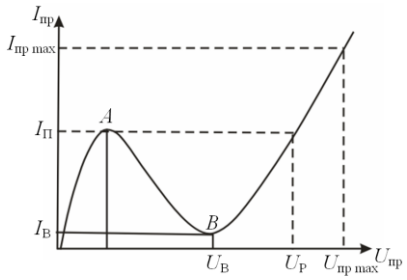


Рис. 17.2.4. Воль-амперна характеристика тунельного діода

Тунельні діоди використовуються для генерації та посилення електромагнітних коливань, а також у швидкодіючих перемикаючих та імпульсних схемах.

Основні параметри тунельного діода.

Піковий струм $I_П$ – прямий струм в точці максимуму ВАХ; струм впадини $I_В$ – прямий струм в точці мінімуму його характеристики; напруга піку $U_П$ – пряма напруга, що відповідає струму піка; напруга впадини $U_В$ – пряма напруга, яка відповідає струму впадини; напруга розчину $U_Р$ – пряма напруга, більше напруги впадини, при якому струм дорівнює піковому.

Варикапи. Варикап – це напівпровідниковий діод, в якому використовується залежність бар'єрної ємності *p-n*-переходу від зворотної напруги. Таким чином, варикап можна розглядати як конденсатор, ємність якого можна регулювати за допомогою електричного сигналу. Максимальне значення ємності варикап має при нульовій зворотній напрузі. При збільшенні зворотної напруги ємність варикапа зменшується. Вольт-фарадна характеристика варикапа зображена на рис. 17.2.17.

Основні параметри варикапа.

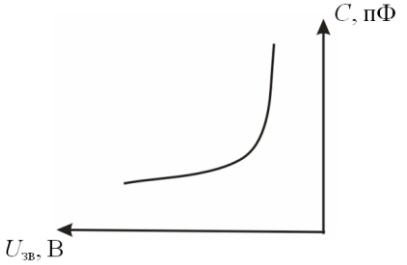


Рис. 17.2.17. Вольт-фарадна характеристика варикапа

Загальна ємність варикапа $C_в$ – ємність, яка виміряна при певній зворотній напрузі (вимірюється при U=17 В і складає десятки-сотні пФ).

Коефіцієнт перекриття по ємності $K_п = \dfrac{C_{в\,max}}{C_{в\,min}}$ – відношення ємностей варикапа при двох крайніх значеннях зворотньої напруги ($K_п$=17-8).

Добротність варикапа $Q = \dfrac{X_C}{r_П}$, де X_C – реактивний опір варикапа; $r_П$ – опір активних втрат.

Зворотній струм $I_{зв}$ – постійний струм, який протікає через варикап у зворотньому напрямку при заданій зворотній напрузі.

Температурний коефіцієнт ємності – відносна зміна ємності варикапа, що припадає на один градус зміни температури навколишнього середовища: $\alpha = \dfrac{\Delta C}{C \Delta T}$.

Варикапи застосовуються як елементи з електрично керованою ємністю в схемах перебудови частоти коливального контуру, розподілу і множення частоти, частотної модуляції, керованих фазообертачів та ін.

Випромінюючий діод – напівпровідниковий діод, що випромінює з області p-n переходу кванти енергії. Випромінювання випускається через прозору скляну пластину, розміщену в корпусі діода. За характеристикою випромінювання випромінюючі діоди діляться на дві групи: діоди з випромінюванням у видимій області спектра, що отримали назву світлодіоди; діоди з випромінюванням в інфрачервоній області спектру, що отримали назву ІЧ-діоди. Принцип дії обох груп діодів однаковий і базується на рекомбінації носіїв заряду при прямому струмі через випрямляючий електричний перехід.

Контрольні запитання до лекції № 17.

1. Що називають напівпровідниковим діодом?
2. Як на діод подати пряме зміщення?
3. Як класифікуються напівпровідникові діоди?
4. Поясніть особливості будови площинних та точкових діодів.
5. Як символьно позначаються напівпровідникові діоди?
6. Які діоди називаються випрямляючими? Назвіть їхні основні параметри.
7. Що таке стабілітрони? Якими основними параметрами вони характеризуються?
8. Що таке тунельні діоди? Назвіть основні параметри тунельних діодів?
9. Що таке варикапи? Назвіть основні параметри, за якими характеризуються варикапи.
10. Що таке випромінюючі діоди? На чому грунтується їхній принцип роботи?

ЛЕКЦІЯ 18. ТРАНЗИСТОРИ

18.1. Будова та принцип дії біполярних транзисторів.

Біполярним транзистором називають напівпровідниковий прилад, що має два *p-n* переходи і три виводи та здатний підсилювати потужність сигналу. Біполярний транзистор був винайдений американськими фізиками Джоном Бардіном й Волтером Браттейном у 1948 р Вони разом з американським фізиком Уїльямом Шоклі в 19518 р були нагороджені Нобелівською премією за дослідження напівпровідників і відкриття транзисторного ефекту. Транзистори називають біполярними, тому що їхня робота заснована на використанні носіїв заряду, як електронів, так і дірок.

Біполярні транзистори дозволяють підсилювати, генерувати та перетворювати електричні коливання в широкому діапазоні частот і потужностей. Відповідно до цього їх можна розділити на низькочастотні (до 3 МГц), середньочастотні (3-30 МГц), високочастотні (30-300 МГц), надвисокочастотні (більше 300 МГц). За потужністю їх можна розділити на малопотужні (не більше 0,3 Вт), середньої потужності (0,3-1,5 Вт) і великої потужності (більше 1,5 Вт).

Основним елементом біполярного транзистора є кристал напівпровідника (германію чи кремнію), у якому створено три області з різною провідністю. Дві крайні області завжди мають провідність однакового типу, що є протилежною провідності в середній області. Схематична будова площинного біполярного транзистора наведена на рис. 18.1.1.

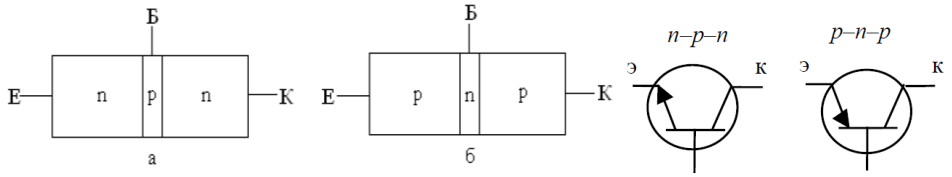


Рис. 18.1.1. Схематичне зображення біполярного транзистора: а – транзистор типу n-p-n, б – транзистор типу p-n-p

Внутрішня область монокристала транзистора, яка розташована між *p-n* переходами називається *базою*. Зовнішня область, яка призначена для інжектування носіїв у базу, називається *емітером*. Інша область яка втягує носії з бази (екстракція носіїв), називається *колектором*. Перехід між емітером і базою називається емітерним переходом, а перехід між базою і колектором – колекторним. Існує два типи біполярних транзисторів: *n-p-n* (рис. 18.1.1, а) та *p-n-p* (рис. 18.1.1, б).

Основною особливістю будови біполярного транзистора є нерівномірність концентрації основних носіїв заряду у емітері, базі та колекторі. У емітері концентрація носіїв є максимальною, у колекторі – дещо меншою, а у базі – набагато меншою, ніж у емітері та колекторі (рис. 18.1.2).

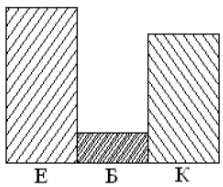
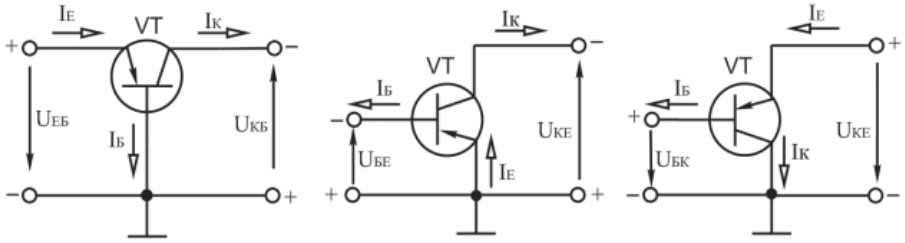


Рис. 18.1.2.
Концентрація основних носіїв заряду в областях біполярного транзистора

Якщо між базою й емітером створити напругу в прямому напрямку, то носії заряду інжектуються в базу й дифундують до колектора. Оскільки вони є неосновними носіями в базі, то легко проникають через *p-n* перехід між базою й колектором. База виготовляється достатньо тонкою, щоб носії зараду не встигли прорекомбінувати, створивши значний струм бази. Якщо між базою й емітером прикласти запірну напругу, то струм до колектора не протікатиме.

Від бази, емітера і колектора зроблені виводи. Залежно від того, який з виводів є спільним для вхідного і вихідного електричних кіл, розрізняють три схеми вмикання біполярного транзистора: з *спільною базою (СБ)*, *з спільним емітером (СЕ)*, з *спільним колектором (СК)* (рис. 18.1.3).

При будь-якій схемі вмикання транзистора (при роботі в активному режимі) полярність включення джерел живлення повинна бути вибрана такою, щоб емітерний перехід був зміщений в прямому напрямку, а колекторний – в зворотному.



а б в

Рис. 18.1.3. Схеми вмикання біполярних транзисторів: а) СБ; б) СЕ; в) СК

18.2. Принцип дії біполярних транзисторів.

Розглянемо принцип дії транзистора на прикладі транзистора *p-n-p*- типу, увімкненого за схемою з спільною базою.

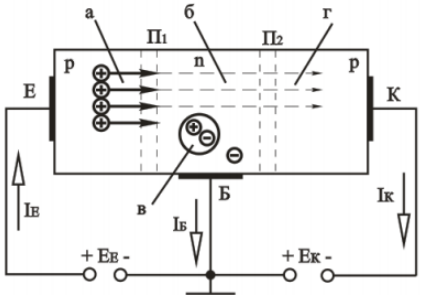


Рис. 18.2.1 Принцип дії біполярного транзистора (p-n-p- типу): а – інжекція; б – дифузія; в – рекомбінація; г – екстракція

Зовнішня напруга двох джерел живлення E_E і E_K підключають до транзистора так, щоб забезпечувалося зміщення емітерного переходу $П_1$ в прямому напрямку (пряма напруга), а колекторного переходу $П_2$ – у зворотному напрямку (зворотна напруга). Якщо до колекторного переходу прикладена зворотна напруга, а коло емітера розімкнене, то в колі колектора протікає невеликий зворотний струм $I_{К\,ЗВ}$ (одиниці мікроампер). Цей струм виникає під дією зворотної напруги і створюється направленим переміщенням неосновних носіїв заряду дірок бази і електронів колектора через колекторний перехід транзистора. Зворотний струм протікає по колу: $+E_K$, база-колектор, $–E_K$. Величина зворотного струму колектора не залежить від напруги на колекторі, але залежить від температури напівпровідника.

При подачі в коло емітера постійної напруги E_E в прямому напрямку потенціальний бар'єр емітерного переходу знижується. Починається інжектування (вприскування) дірок в базу. Зовнішня напруга, що прикладена до транзистора, виявляється прикладеною в основному до переходів $П_1$ і $П_2$, оскільки вони мають великий опір в порівнянні з опором базової, емітерної і колекторної областей. Тому інжектовані в базу дірки переміщаються в ній за допомогою дифузії. При цьому дірки рекомбінують з електронами бази. Оскільки концентрація носіїв в базі значно менша, ніж в емітері, то рекомбінують дуже небагато дірок. При малій товщині бази майже всі дірки доходитимуть до колекторного переходу $П_2$. На місце рекомбінованих електронів в базу поступають електрони від джерела живлення E_K. Дірки, які рекомбінували з електронами в базі, створюють струм бази $I_Б$.

Під дією зворотної напруги E_K потенціальний бар'єр колекторного переходу підвищується, товщина переходу $П_2$ збільшується. Але потенційний бар'єр колекторного переходу не створює перешкоди для проходження через нього дірок. Дірки, що увійшли

до області колекторного переходу потрапляють в сильне прискорююче поле, створене на переході колекторною напругою, і екстрагуються (втягуються) колектором, створюючи колекторний струм I_K. Колекторний струм протікає по колу: $+E_K$, база-колектор, $-E_K$.

Таким чином, в транзисторі протікає три струми: струм емітера, колектора і бази.

У проводі, що є виводом бази, струми емітера і колектора направлені зустрічно. Отже, струм бази рівний різниці струмів емітера і колектора:

$$I_Б = I_E - I_K \tag{18.2.1}$$

Повний струм емітера I_E визначається кількістю інжектованих емітером основних носіїв заряду. Основна частина цих носіїв заряду досягаючи колектора, створює колекторний струм I_K. Незначна частина інжектованих в базу носіїв заряду рекомбінують в базі, створюючи струм бази $I_Б$. Отже, струм емітера розділяється на струми бази і колектора, тобто

$$I_E = I_Б + I_K \tag{18.2.2}$$

Струм емітера є вхідним струмом, струм колектора – вихідним. Вихідний струм складає частину вхідного, тобто

$$\Delta I_K = \alpha \Delta I_E \tag{18.2.3}$$

де α – коефіцієнт передачі струму для схеми з СБ.

Оскільки вихідний струм менше вхідного, то коефіцієнт $\alpha < 1$. Він показує, яка частина інжектованих в базу носіїв заряду досягає колектора. Зазвичай величина α складає 0,95…0,995.

У схемі з спільним емітером вихідним струмом є струм колектора, а вхідним – струм бази. Коефіцієнт підсилення за струмом для схеми з СЕ:

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_Б} \tag{18.2.4}$$

Але

$$\Delta I_Б = \Delta I_E - \Delta I_K = \Delta I_E - \alpha \Delta I_E = \Delta I_E (1 - \alpha)$$

Тоді

$$\beta = \frac{\alpha \Delta I_E}{\Delta I_E (1 - \alpha)} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \tag{18.2.5}$$

Отже, коефіцієнт підсилення за струмом для схеми з СЕ складає десятки одиниць. Вихідний струм транзистора залежить від вхідного струму. Тому транзистор – це напівпровідниковий прилад, який керується струмом. Зміни струму емітера I_E, що викликані зміною напруги емітерного переходу, повністю передаються в колекторне коло, викликаючи зміну струму колектора I_K. А оскільки напруга джерела колекторного живлення E_K значно більше, чим емітерного E_E, то і потужність, споживана у колі колектора P_K, буде значно більше потужності в колі емітера P_E. Таким чином, забезпечується можливість управління великою потужністю в колекторному колі транзистора малою потужністю, що витрачається в емітерному колі, тобто має місце підсилення потужності.

Коефіцієнт підсилення по напрузі визначається за формулою:

$$K_U = \frac{\Delta U_2}{\Delta U_1} \text{ або } K_U = \frac{I_2 R_H}{I_1 R_{BX}} \tag{18.2.18}$$

Де ΔU_2 – зміна напруга на виході; ΔU_1 – зміна напруга на вході; I_2 – сила струму в колі виходу; I_1 – сила струму в колі входу; R_H – опір навантаження; R_{BX} – вхідний опір.

Коефіцієнт підсилення транзистора по потужності рівний відношенню вихідної потужності P_2 до потужності P_1, що подається на вхід:

$$K_P = \frac{P_2}{P_1}. \tag{18.2.7}$$

Цей коефіцієнт можна визначити добутком коефіцієнтів підсилення по струму на коефіцієнт підсилення по напрузі:

$$K_P = K_I K_U . \qquad (18.2.8)$$

У залежності від полярності напруг, які прикладені до емітерного і колекторного переходів транзистора розрізняють 4 режими його роботи.

Активний режим – відповідає випадку, розглянутому при аналізі підсилюючих властивостей транзистора. На емітерний перехід подається пряма напруга, а на колекторний – зворотня. Внаслідок того, що напруга в колі колектора значно перевищує напругу, що прикладена до емітерного переходу, а струми у областях колектора та емітера майже однакові, потужність корисного сигналу на виході схеми (у колекторному колі) буде набагато більшою за потужність сигналу на вході транзистора (у емітерному колі). Цей режим є основним режимом роботи транзистора.

Інверсний режим – повністю протилежний активному режиму. При цьому до емітерного переходу підводиться зворотня напруга, а до колекторного – пряма. Емітер і колектор міняють свої функції на протилежні – емітер виконує функції колектора і навпаки. У такому режимі транзистор також може використовуватися для підсилення. Однак через конструктивні відмінності між областями колектора і емітера підсилювальні властивості транзистора в інверсному режимі виявляються набагато гірше, ніж в активному режимі. Тому на практиці інверсний режим практично не використовується.

Режим насичення (режим подвійної інжекції) – обидва переходи транзистора знаходяться під прямим зміщенням. У цьому випадку вихідний струм транзистора не може управлятися його вхідним струмом, тобто підсилення сигналів неможливе. Режим насичення використовується в ключових схемах, де в задачу транзисторів входить не підсилення сигналів, а замикання / розмикання різноманітних електричних кіл. У цьому режимі транзистор буде повністю відкритим.

Режим відсікання – до обох переходів підводяться зворотні напруги. Такий режим також використовується в ключових схемах. Оскільки в цьому режимі вихідний струм транзистора практично дорівнює нулю, то це відповідає розмиканню транзисторного ключа.

Варто зауважити, що крім названих основних робочих режимів в транзисторі можливий режим пробою на різних переходах. Зазвичай він виникає тільки в разі аварії і не використовується в роботі, проте існують спеціальні лавинні біполярні транзистори, в яких режим пробою є якраз основним робочим режимом.

Контрольні запитання до лекції № 18.

1. Що називають біполярними транзисторами та для чого вони призначені?
2. Зобразіть схематично будова площинного біполярного транзистора.
3. Яке призначення бази, емітера та колектора у біполярному транзисторі?
4. Які є схеми вмикання біполярного транзистора? Уміти графічно їх зобразити.
5. У чому полягає фізичний зміст інжекції, дифузії, рекомбінації та екстракції?
6. Поясніть принцип дії біполярного транзистора.
7. Запишіть формулу визначення коефіцієнта підсилення за струмом для схеми з СЕ.
8. За якою формулою можна визначити коефіцієнт підсилення транзистора по напрузі?
9. За якою формулою можна визначити коефіцієнт підсилення транзистора по потужності?
10. Які є режими роботи транзистора? Дайте коротку характеристику кожного з цих режимів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кевшин А. Г. Фізика : конспект лекцій. Луцьк : ПП Іванюк В.П., 2016. 100 с.
2. Кевшин А. Г., Федосов С. А., Галян В. В. Фізика : задачі. Луцьк : Вежа-Друк, 2020. 68 с.
3. Кевшин А. Г., Федосов С. А., Галян В. В. Фізика : методичні рекомендації до лабораторних робіт. Луцьк : Вежа-Друк, 2020. 63 с.
4. Кевшин А. Г., Галян В. В. Електроніка : конспект лекцій. Луцьк : Вежа-Друк, 2018. 87 с.
5. Кевшин А. Г., Новосад О. В., Федосов С. А. Електроніка: задачі. Луцьк : Вежа-Друк, 48 с.
4. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики : у 3-х т. / Т.1. Механіка, молекулярна фізика і термодинаміка. К. : Техніка, 2006. 536 с.
5. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики : у 3-х т. / Т.2. Електрика і магнетизм. К. : Техніка, 2006. 452 с.
6. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики : у 3-х т. / Т.3. Оптика. Квантова фізика. К. : Техніка, 2006. 520 с.
7. Новосад О. В., Кевшин А. Г., Федосов С. А., Третяк А. П., Хмарук Г. П. Фізика : метод. рек. до лаб. роб. Луцьк : Вежа-Друк, 2021. Ч.2. 88 с.
8. Федосов С. А., Кевшин А. Г., Шигорін П. П. Основи метрології. Частина 1 : Фізичні величини та одиниці їх вимірювання. Види, методи та засоби вимірювань. Навчальний посібник. Луцьк : Вежа-Друк, 2014. 44 с.
9. Федосов С. А., Замируєва О. В., Захарчук Д. А., Кевшин А. Г., Новосад О. В. Структурні елементи напівпровідникових пристроїв : курс лекцій. Ч. 1 : *p-n* переходи. Луцьк : Вежа-Друк, 2019. 84 с.
10. Федосов С. А., Замируєва О. В., Сахнюк В. Є., Захарчук Д. А., Кевшин А. Г., Новосад О. В. Структурні елементи напівпровідникових пристроїв : задачі. Луцьк : Вежа-Друк, 2020. 32 с.

Навчально-методичне видання

Кевшин Андрій Григорович
Галян Володимир Володимирович

ФІЗИКА З ОСНОВАМИ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Конспект лекцій

Друкується в авторській редакції