

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

**Інженерно-енергетичний факультет**

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

**ФІЗИКА З ОСНОВАМИ БІОФІЗИКИ**

конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти ОПП «Агрономія» спеціальності Н1 «Агрономія» денної форми здобуття вищої освіти

УДК 53

Ф48

Рекомендовано до друку науково-методичною комісією інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету від 17.03.2026, протокол № 6.

#### Укладач

Лариса Вахоніна – канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївського національного аграрного університету.

#### Рецензенти

Олексі Садовий - канд. тех. наук доцент, завідувач кафедри агроінженерії, Миколаївський національний аграрний університет.

Андрій Ставинський – д-р техн. наук, професор, зав. кафедрою електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

© Миколаївський національний  
аграрний університет, 2026

## Зміст:

Вступ	4
Модуль 1. Механіка матеріальної точки.	5
<i>Лекція №1.</i> Основна задача механіки. Кінематика матеріальної точки	5
<i>Лекція №2.</i> Динаміка матеріальної точки Механічна робота. Енергія. ККД механізмів	10
Модуль 2. Механіка твердого тіла	20
<i>Лекція №3.</i> Механіка обертового руху твердого тіла. Механіка рідин і газів	20
Модуль 3. Основи МКТ. Термодинаміка	27
<i>Лекція №4.</i> Основи молекулярно – кінетичної теорії Ідеальний газ. Газові закони	27
<i>Лекція №5.</i> Основи термодинаміки Теплові машини	34
<i>Лекція №6.</i> Реальний газ	42
<i>Лекція №7.</i> В'язкість рідини. Закон Стокса Поверхневі явища. Сила поверхневого натягу	45
Модуль 4. Електричний струм	49
<i>Лекція №8.</i> Електростатика	49
<i>Лекція №9.</i> . Електричний струм Термоелектричні та термоелектронні явища	54
<i>Лекція №10.</i> Електричний струм в різних середовищах (рідина, газ, вакуум).	
Напівпровідники в електричному полі	62
Модуль 5. Електромагнетизм	69
<i>Лекція №11.</i> Електромагнетизм Електромагнітна індукція	69
<i>Лекція №12.</i> Змінний електричний струм. Конденсатор та котушка індуктивності в колі змінного електричного струму	79
Модуль 6. Хвильові процеси. Геометрична та хвильова оптика	86
<i>Лекція №13.</i> Хвильові процеси	86
Модуль 7. Квантові властивості світла	99
<i>Лекція №14.</i> Фотоелектричний ефект Зовнішній та внутрішній фотоефект	99
Модуль 8. Будова атома	105
<i>Лекція №15</i> Будова атома. Елементи фізики атомного ядра	105
Література	113

## Вступ

В запропонованому конспекті лекцій з курсу «Фізика» приведено матеріал з класичної та сучасної фізики: дані визначення фізичних понять, коротко сформульовані фізичні закони й приведені необхідні пояснення.

Останнім часом внаслідок введення нових дисциплін час вивчення курсу фізики значно скорочено. Однак програма з фізики залишилась незмінною. Це потребує нових підходів до викладання фізики і нових підручників, які б враховували значно скорочені обсяги часу на вивчення фізики. Підручники з фізики, як правило, багатотомові й розраховані на трисеместрове викладання. При самостійній роботі це викликає значні труднощі для студентів. Тому виникла потреба разом з новим курсом мати скорочений у вигляді конспекту лекцій, який відповідає об'єму викладання в Університеті, а підручники використовувати для більш поглибленого вивчення фізики під час самостійної роботи студентів.

Курс лекцій охоплює в скороченому викладанні практично весь матеріал вказаного тритомного курсу. При цьому максимально скорочено математичний апарат, приділено увагу фізичному змісту понять, явищ і законів. Обмежений об'єм конспекту лекцій не дозволив включити в нього експериментальні методи досліджень, опис дослідів та приладів й інший експериментальний матеріал. Все це сприяє при обмеженому обсягу часу на вивчення дисципліни якісно оволодіти основними поняттями, явищами і законами фізики при незмінній програмі з дисципліни.

## **Модуль 1. Механіка матеріальної точки.**

### **Лекція №1. Основна задача механіки. Кінематика матеріальної точки - 2 год.**

- План:*
1. Деякі відомості з математики;
  2. Предмет, мета і методи фізичних досліджень;
  3. Система СІ;
  4. Основи кінематики руху матеріальної точки.
  5. Задачі кінематики
  6. Рівномірний прямолінійний рух. Швидкість
  7. Рівнозмінний прямолінійний рух. Прискорення
  8. Часний випадок рівнозмінного руху- рух під дією тяжіння землі
  9. Обертний рух матеріальної точки та його характеристики
  10. Коливальний рух та його характеристики

#### **Деякі відомості з математики**

Математика відіграє виключно важливу роль в фізиці. Без неї сучасна фізика немислима. Математика адекватний кількісний апарат для фізиків. В процесі розвитку фізика і математика взаємно збагачують одна одну. Але необхідно правильно уявляти істинну роль математики і фізики. Чиста математика має справу з абстрактними об'єктами і поняттями. При побудові теорії фізика замінює реальні об'єкти їх ідеалізованими моделями, що приблизно правильно передають не всі властивості реального об'єкта, а тільки ті з них, які суттєві в тому колі питань, що розглядаються. Які властивості реальних об'єктів суттєві, а які не відіграють помітної ролі – на це питання може відповісти тільки дослід, якому належить вирішальне слово в питанні про правильність будь-якої фізичної теорії і межах її-використання.

#### **Предмет, мета і методи фізичних досліджень**

Фізика – це наука про природу. Вона вивчає матерію та більш прості і разом з тим більш загальні форми її руху, а також фундаментальну взаємодію природи, що керує рухами матерії.

Деякі закономірності є загальними для всіх матеріальних систем, наприклад збереження енергії, - їх називають фізичними законами.

Фізику іноді називають «фундаментальною наукою», оскільки інші природничі науки (біологія, геологія, хімія та ін) описують тільки деякий клас матеріальних систем, що підкоряються законам фізики. Наприклад, хімія вивчає атоми, утворені з них речовини та перетворення однієї речовини в іншу. Хімічні ж властивості речовини однозначно визначаються фізичними властивостями атомів і молекул, описуваними в таких розділах фізики, як термодинаміка, електромагнетизм і квантова фізика.

Фізика тісно пов'язана з математикою: математика надає апарат, за допомогою якого фізичні закони можуть бути точно сформульовані. Фізичні теорії майже завжди формулюються у вигляді математичних виразів, причому використовуються більш складні розділи математики, ніж зазвичай в інших науках. І навпаки, розвиток багатьох галузей математики стимулювалося потребами фізичних теорій.

Основна задача механіки в тому, щоб, знаючи сили, діючі на тіло, визначити положення (координати) цього тіла в любий проміжок часу. Це пряма задача механіки. Оберненою задачею є знаходження сил, які спричинили цей рух.

Механіка тісно пов'язана з багатьма розділами фізики. Ряд понять і методів механіки при відповідних узагальненнях знаходять застосування в статичній фізиці, оптиці, квантовій механіці, електродинаміці, теорії відносності і ін.

Принципи фізичних пошуків дещо відрізняються від таких в інших науках тому, що тут існує чітко визначений розподіл на теорію та експеримент, і з 20 століття більшість фізиків спеціалізується або на теоретичній фізиці, або на експериментальній, і дуже мало таких, які б досягли успіхів в обох напрямках. На відміну, практично всі успішні теоретики біології та хімії також були і експериментаторами.

Коротко кажучи, теоретики займаються пошуком теорій, які могли б пояснити існуючі експериментальні результати та передбачити нові, тоді як експериментатори організують свої практичні дослідження для перевірки результатів теорій. Тобто, незважаючи на існування двох чітких напрямів, вони тісно пов'язані один з одним. Тому прориви в фізиці часто відбуваються саме тоді, коли експериментатори виявляють, що існуючі теорії не можуть пояснити їхніх результатів, і це потребує побудови нових фізичних теорій.

### **Система СІ;**

Міжнародна система одиниць— це сучасна форма метричної системи, збудована на базі семи основних одиниць. Система СІ є найчастіше використовуваною системою одиниць при проведенні розрахунків в різних галузях науки, техніки, торгівлі тощо.

Головна мета впровадження такої системи — об'єднання великої кількості систем одиниць (СГС, МКГСС, МКС тощо) з різних галузей науки та техніки та усунення труднощів, пов'язаних з використанням значної кількості коефіцієнтів при перерахунках між ними та створенням великої кількості еталонів для забезпечення необхідної точності. Переваги СІ забезпечують підвищення продуктивності праці проєктантів, виробників, науковців, спрощують та полегшують навчальний процес, а також практику міжнародних контактів між державами.

Міжнародна система одиниць СІ складається з набору одиниць вимірювання та набору кратних і часткових префіксів до них. Система також визначає стандартні скорочені позначення для одиниць та правила запису похідних одиниць.

Система СІ не є незмінною, вона є набором стандартів, в якому створюються одиниці виміру та коригуються їхні визначення згідно з міжнародними угодами в залежності від рівня сучасного розвитку вимірювальних технологій.

### **Основи кінематики руху матеріальної точки**

Кінематика вивчає рух тіл, не розглядаючи ті причини, які цей рух обумовили.

Нехай матеріальна точка переміщується з точки А в точку В (рис. 1). Відстань від точки А до точки В, взята вздовж траєкторії, являє собою пройдений шлях  $S$ . Вектором переміщення називають відрізок прямої, проведеної з початкового положення в кінцеве положення тіла (вектор  $\overrightarrow{AB}$ ). Якщо тіло перемістилося з точки С в точку В, то другим переміщенням буде вектор  $\overrightarrow{CB}$ . Результуючим переміщенням буде вектор  $\overrightarrow{AB}$ , який дорівнює сумі векторів  $\overrightarrow{AC}$  та  $\overrightarrow{CB}$ , оскільки, як видно з рис. 1, відрізок АВ є діагоналлю паралелограма, побудованого на відрізках АС та СВ.

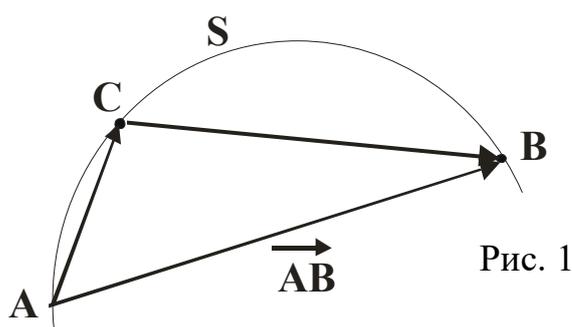


Рис. 1

Вектор переміщення співпадає з ділянкою траєкторії лише при прямолінійному русі. При криволінійній траєкторії шлях не співпадає з переміщенням. Але, якщо взяти достатньо мале переміщення, то з визначеною точністю можна замінити відрізок шляху  $\Delta S$  вектором переміщення  $\Delta \vec{S}$ . Таке мале переміщення називається елементарним переміщенням.

Шлях, пройдений тілом, являється функцією часу. При рівномірному русі швидкість тіла визначається просто як шлях, пройдений тілом за одиницю часу.

Для більш повної характеристики змінного руху вводять поняття миттєвої швидкості. Якщо за невеликий проміжок часу  $\Delta t$  тіло проходить шлях  $\Delta S$ , то швидкість дорівнюватиме:

$$v_{cp} = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (1)$$

Величина миттєвої швидкості (швидкість в даній точці шляху) рівна границі до якої наближається відношення приросту шляху до відповідного приросту часу при умові, що  $\Delta t$  наближається до нуля.

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (2)$$

В математиці ця границя називається похідною від шляху по часу і позначається так:

$$v = \frac{dS}{dt} \quad (3)$$

Формулу (3) можна записати і через нескінченно мале переміщення  $\overrightarrow{dS}$ :

$$\vec{v} = \frac{\overrightarrow{dS}}{\overrightarrow{dt}} \quad (4)$$

Вектор швидкості співпадає по напрямку з нескінченно малим переміщенням (тобто з дотичною до траєкторії) і чисельно рівний похідній від шляху до часу. В більшості випадків при русі швидкість змінюється і по величині і по напрямку. Для характеристики зміни швидкості вводиться поняття прискорення.

В випадку прямолінійного нерівномірного руху середнє прискорення за проміжок часу  $\Delta t$  дорівнює відношенню зміни швидкості до цього проміжку часу.

$$\vec{a}_{cp} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}; a_{\tau} = \frac{\Delta v}{\Delta t}; a_n = \frac{v^2}{R} \quad (5)$$

Прискорення, яке тіло має в даній момент (в даній точці шляху) дорівнює границі, до якої наближається права частина рівняння (5) при зменшенні проміжку часу  $\Delta t$  до нуля, тобто дорівнює похідній швидкості від часу.

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (6)$$

Враховуючи, що швидкість дорівнює похідній шляху по часу, знаходимо, що прискорення дорівнює другій похідній шляху по часу:

$$\alpha = \frac{d}{dt} \left( \frac{dS}{dt} \right) = \frac{d^2 S}{dt^2} \quad (7)$$

Таким чином, якщо відомий шлях тіла як функція часу, то легко визначити його швидкість і прискорення в будь – який проміжок часу.

З курсу середньої школи відомі ще такі співвідношення кінематики (знайти їх інтегруванням):

$$v = v_0 + \alpha t; S = v_0 t + \frac{\alpha t^2}{2}; v = \sqrt{v_0^2 + 2\alpha S} \quad 8)$$

де  $v_0$  – швидкість тіла в момент часу  $t = 0$ ;  $S$  – шлях пройдений тілом за  $t$  часу.

Головним завданням кінематики є математичне (рівняннями, графіками, таблицями тощо) визначення положення та характеристик руху точок або тіл у часі. Будь-який рух розглядається у певній системі відліку. Також кінематика займається вивченням складових рухів (рухів у двох системах відліку, що взаємно переміщаються).

### **Основи кінематики обертового руху матеріальної точки**

Рухи, що відбуваються у природі та техніці, можуть розрізнятися за двома ознаками: за зміною значення швидкості та за зміною її напрямку. Так, наприклад, коли точка чи тіло рухаються вздовж прямої лінії (мають прямолінійну траєкторію), то напрям їх швидкості не змінюється - він збігається з напрямом

траєкторії. Хоча при цьому значення швидкості може змінюватись. У цьому випадку рух називають нерівномірним.

Але ж рухи можуть мати й криволінійні траєкторії, найпростішими з яких є траєкторії колові. Зрозуміло, що такий рух може бути й рівномірним, тобто кожна точка нитки буде мати швидкість, яка не змінюватиметься з часом за своїм значенням, хоча напрям швидкості точок у кожний момент може змінюватись.

Розглянемо рух матеріальної точки по колу, коли він є рівномірним, тобто значення швидкості з часом не змінюється. Точка, рухаючись по колу радіуса  $R$ , за певний час  $t$  переходить з точки  $A$  в точку  $B$ . При цьому відрізок  $OA$  повертається на кут  $\phi$  — кутове переміщення. За цими даними можна схарактеризувати рух кутовою швидкістю, де  $\phi$  (грецька літера «фі») — кутове переміщення;  $\omega$  (грецька літера «омега») — кутова швидкість.

Кутове переміщення вимірюється в радіанах (рад.). 1 радіан це таке кутове переміщення, коли траєкторія руху точки - довжина дуги кола  $AB$  - дорівнює довжині радіуса  $R$ .

Отже, одиницею кутової швидкості є радіан за секунду (рад/с).

1 рад/с дорівнює кутовій швидкості такого рівномірного руху по колу, під час якого за 1 с здійснюється кутове переміщення 1 рад.

При визначенні кутової швидкості слово рад не пишуть, а зазначають 1/с, мається на увазі рад/с.

Рух точки по колу (та обертання твердого тіла) характеризують такі фізичні величини, як період і частота обертання.

Період обертання ( $T$ ) — це час, протягом якого точка (тіло) робить один повний оберт по колу.

### **Швидкість**

Швидкість — фізична величина, що відповідає відношенню переміщення тіла до проміжку часу, за який це переміщення відбувалось. Швидкість — величина векторна, тобто вона має абсолютну величину і напрямок.

При обертанні матеріальної точки по колу з радіусом  $R$  її швидкість визначається формулою

$$v = \omega R.$$

Загалом, якщо розглядати рух матеріальної точки в площині в полярній системі координат, то швидкість можна розкласти на дві складові: радіальну й тангенціальну. Радіальна складова швидкості направлена вздовж радіус-вектора точки й описує віддалення або наближення точки до початку системи координат. Тангенціальна складова направлена перпендикулярно до радіус-вектора, й описує обертання точки навколо початку відліку системи координат.

### **Прискорення**

Якщо тіло рухається по колу із сталою кутовою швидкістю  $\omega$ , то його прискорення спрямоване до центра кола й дорівнює за абсолютною величиною

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

де  $R$  - радіус кола,  $v = \omega R$  - швидкість тіла.

У векторному записі:

$$\mathbf{a} = -\omega^2 \mathbf{r}$$

де - радіус-вектор. .

Знак мінус вказує на те, що прискорення спрямоване до центра кола.

## **Лекція №2. Динаміка матеріальної точки Механічна робота. Енергія. ККД механізмів - 2 год.**

*План:*

1. Задача динаміки
2. Інерціальні системи відліку Перший з-н Ньютона
3. Сила, маса. Другий закон Ньютона
4. Третій закон Ньютона
5. Сила тяжіння. Закон Всесвітнього тяжіння. Вага тіла
6. Деформація, сила пружності, закон Гука.
7. Сила тертя. Архімедова сила. Закон Архімеда. Умови плавання тіл.
8. Закон збереження імпульсу тіла
9. Визначення механічної роботи. Потужність механізмів
10. Робота рухомих тіл кінетична енергія. Робота сили тяжіння. Потенціальна енергія
11. Закон збереження енергії. ККД механізмів

### **Закони Ньютона**

Ньютонові закони руху— це фундаментальні закони класичної механіки.

Закони Ньютона разом з його ж законом всесвітнього тяжіння та апаратом математичного аналізу вперше в свій час надали загальне та кількісне пояснення широкому спектру фізичних явищ, починаючи з особливостей руху маятника та закінчуючи орбітами Місяця та планет. Закон збереження імпульсу, який Ньютон вивів як наслідок своїх другого та третього законів, також став першим з відомих законом збереження.

Перший закон Ньютона

Цей закон також має назву закону інерції або принципу Галілея. Його формулювання в сучасному викладі таке:

існують такі системи відліку, в яких центр мас будь-якого тіла, на яке не діють ніякі сили або рівнодійна діючих на нього сил дорівнює нулю, зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху, допоки цей стан не змінять сили, застосовані до нього.

Цей закон є спеціальним випадком другого закону Ньютона (дивись нижче), але його значення полягає в тому, що він визначає системи відліку, в яких справедливі наступні два закони. Ці системи відліку мають назву інерційних або Галілеєвих, тобто таких, які рухаються зі сталою швидкістю одна відносно іншої.

Другий закон Ньютона: базовий закон динаміки

Формулювання:

Прискорення матеріальної точки прямо пропорційне силі, яка на неї діє, та направлене в сторону дії цієї сили

Математично це формулювання може бути записано так:

$$\mathbf{F} = \frac{d}{dt}(m\mathbf{v})$$

Або  $\mathbf{F} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = m\mathbf{a}$ , якщо  $m$  — константа. Де

$F$  — сила, яка діє на тіло

$m$  — маса тіла

$a$  — прискорення

$v$  — швидкість

$m\mathbf{v}$  — імпульс, який також позначається як  $P$ .

Це рівняння фактично означає, що чим більша за абсолютним значенням сила буде прикладена до тіла, тим більшим буде його прискорення. Параметр  $m$  або маса в цьому рівнянні — це насправді коефіцієнт пропорційності, який характеризує інерційні властивості об'єкта.

У рівнянні  $F=ma$  прискорення може бути безпосередньо вимірне, на відміну від сили. Тому цей закон має сенс, якщо ми можемо визначити силу  $F$  безпосередньо. Одним з таких законів, який визначає правило обчислення гравітаційної сили, є закон всесвітнього тяжіння.

У загальному випадку, коли маса та швидкість об'єкта змінюються з часом, отримаємо:

$$\mathbf{F} = \frac{d}{dt}(m\mathbf{v}) = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} + \mathbf{v} \frac{dm}{dt} = m\mathbf{a} + \mathbf{v} \frac{dm}{dt}$$

Рівняння із змінною масою описує реактивний рух.

Важливе фізичне значення цього закону полягає в тому, що тіла взаємодіють, обмінюючись імпульсами й роблять це за допомогою сил.

Третій закон Ньютона: закон дії та протидії

Формулювання:

Сили, що виникають при взаємодії двох тіл, є рівними за модулем і протилежними за напрямом.

Математично це записується так  $\mathbf{F}_{1,2} = -\mathbf{F}_{2,1}$ , де  $\mathbf{F}_{1,2}$  — сила, що діє на перше тіло з боку другого тіла, а  $\mathbf{F}_{2,1}$  — навпаки, сила, що діє з боку першого тіла на друге тіло.

Суперечливого формулювання «на всяку дію є рівна протидія» слід уникати.

Закон у сформульованій формі є справедливим для усіх фізичних сил, хоча існують деякі особливості формулювання цього закону в застосуванні до сил електромагнітного поля.

### **Сили в механіці**

Силу, яка діє на кожне тіло з боку Землі, називають силою тяжіння.

Силу тяжіння можна розрахувати, знаючи масу тіла. Спосіб такого розрахунку підказують результати дослідів.

Якщо взяти динамометр і підвісити до нього важок масою 102 г, то стрілка динамометра зупиниться біля поділки 1 Н. Якщо підвісити два таких важки, то динамометр покаже силу 2 Н і т. д. З цього дослідів можна зробити висновок, що сила тяжіння пропорційна масі тіла.

Сила тяжіння пропорційна масі тіла.

Сила тяжіння є проявом загальноприродного закону, який діє в усьому Всесвіті. Відкритий і сформульований у XVII ст. англійським фізиком Ньютоном, він стверджує, що сила гравітаційної взаємодії у Всесвіті пропорційна масам взаємодіючих тіл і залежить від відстані між ними.

Сили пружності — сили, що виникають в тілі при його пружній деформації викликаного цією деформацією. Є окремим випадком потенційних сил. Наближено описуються законом Гука.

При деформації тіл їх частинки зміщуються одна відносно іншої. Внаслідок цього змінюються відстані між атомами чи молекулами, з яких складаються тіла. Це приводить до зміни сил взаємодії між частинками. Якщо відстані між ними збільшуються (наприклад, при розтягуванні), то силою міжмолекулярної взаємодії є сила притягання. Якщо відстані між частинками зменшуються (наприклад, при стискуванні), то силою міжмолекулярної взаємодії є сила відштовхування. Тобто при деформації тіла у ньому виникають сили, що прагнуть повернути його у попередній стан. Ці сили і є силами пружності, а властивість називають пружністю.

### **Закон зміни імпульсу**

Імпульсом системи  $n$  матеріальних точок називається вектор  $P$ , що дорівнює геометричній сумі імпульсів всіх точок системи та є добутком сумарної маси системи  $M$  на швидкість її центру інерції:

$$P = \sum_{i=1}^n p_i = \sum_{i=1}^n m_i v_i = M v_c$$

Зміна імпульсу системи може відбуватись лише внаслідок зовнішнього впливу, тобто внаслідок дії зовнішніх сил. Жодними внутрішніми процесами та взаємодією внутрішніх часток не можна змінити сумарний імпульс системи.

Зміна імпульсу тіла пропорційна до сили, яка викликає цю зміну, та проміжку часу, за який ця зміна відбувається (другий закон Ньютона):  
 $dp = F \cdot dt$ .

### **Реактивний рух**

Реактивний рух — рух, що виникає за рахунок відкидання частини маси тіла із певною швидкістю.

За законом збереження імпульсу, при відокремленні від тіла масою  $M$  маси  $m$  із швидкістю  $v$ , тіло набуває швидкості  $V$ , яку можна розрахувати за формулою

$$(M - m)V + mv = 0, \text{ а, отже, } V = -\frac{mv}{M - m}.$$

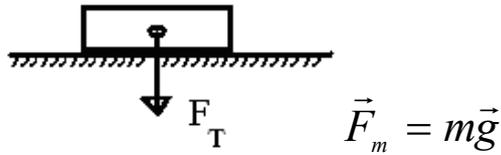
Швидкість  $V$  направлена проти руху відкинутого тіла. Вона тим більша, чим більша маса відкинутого тіла та його швидкість.

В реальних випадках реактивний рух виникає за рахунок сталого викидання газів, які утворюються при спалюванні палива. При цьому маса тіла змінюється неперервно. Спалювання забезпечує високу швидкість витоку газу.

У загальному випадку, коли від тіла неперервно відділяється і приєднується певна маса, реактивний рух описується рівнянням Мещерського.

## Сила тяжіння

Силою тяжіння називається сила, з якою всі тіла притягуються до Землі.



Силу тяжіння можна розрахувати, знаючи масу тіла. Спосіб такого розрахунку підказують результати дослідів.

Якщо взяти динамометр і підвісити до нього важок масою 102 г, то стрілка динамометра зупиниться біля поділки 1 Н. Якщо підвісити два таких важки, то динамометр покаже силу 2 Н і т. д. З цього досліду можна зробити висновок, що сила тяжіння пропорційна масі тіла.

Сила тяжіння пропорційна масі тіла.

Сила тяжіння є проявом загальноприродного закону, який діє в усьому Всесвіті. Відкритий і сформульований у XVII ст. англійським фізиком Ньютоном, він стверджує, що сила гравітаційної взаємодії у Всесвіті пропорційна масам взаємодіючих тіл і залежить від відстані між ними.

### Закон всесвітнього тяжіння

Закон всесвітнього тяжіння — фізичний закон, що описує гравітаційну взаємодію в рамках Ньютонівської механіки. Закон стверджує, що сила притягання між двома тілами (матеріальними точками) прямо пропорційна добутку їхніх мас, і обернено пропорційна квадрату відстані між ними.

У математичній формі закон всесвітнього тяжіння записується для

матеріальних точок у вигляді: 
$$\vec{F}_{12} = -G \frac{m_1 m_2}{r_{12}^3} \vec{r}_{12}$$
 ,де  $\vec{F}_{12}$  — сила, що діє на друге тіло (матеріальну точку) з боку першого тіла,  $G$  — гравітаційна стала,  $m_1$  та  $m_2$  — маси першого та другого тіла, відповідно,  $\vec{r}_{12}$  — вектор, що сполучає перше тіло з другим.  $r_{12}$  — відстань між тілами.

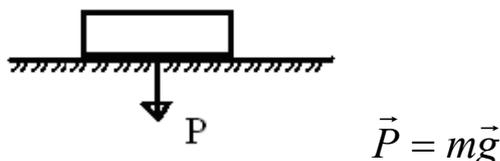
Для абсолютно величини сили: 
$$F_{12} = G \frac{m_1 m_2}{r_{12}^2}$$
 .

Сила притягання, що діє на перше тіло з боку другого тіла однакова за модулем і направлена протилежно:  $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$ .

Стала  $G$ , яку називають гравітаційною сталою, однакова для всіх тіл, тобто є фундаментальною фізичною константою.

### Вага

Вага — сила, яка діє на опору, або на вертикальний підвіс внаслідок впливу сили тяжіння цього об'єкта.



У гравітаційному полі Землі можна вважати з деяким наближенням, що вага тіла зв'язана з його масою співвідношенням  $P = mg$ , де  $P$  — вага,  $g$  — стала прискорення вільного падіння на Землі, а  $m$  — маса тіла.

Як будь-яка сила, вага в системі СІ вимірюється в ньютонках.

Із означення ваги, як сили, з якою тіло діє на опору, тобто сили реакції, вага тіла залежить від його прискорення. Наприклад, у ліфті, що рушає вгору, вага тіла збільшується на величину прискорення ліфта, а у ліфті, який спускається додолу, вага тіла зменшується на величину прискорення. Тіло, яке вільно падає з висоти, втрачає вагу. Такий стан називається невагомістю.

Відповідно, вага залежить від значення прискорення вільного падіння. Коливання прискорення вільного падіння в межах Землі невелике, але на інших небесних тілах, вага тіла з однаковою масою може сильно змінюватися. Наприклад, на Місяці вага тіл зменшується приблизно в шість разів.

Вага тіла, зануреного в рідину, зменшується на вагу витісненої рідини.

**Деформація, сила пружності, закон Гука.**

*Деформація* – це зміна форми та розмірів тіла внаслідок дії зовнішніх сил. Якщо після припинення дії прикладених сил тіло знову приймає первинну форму, то така деформація називається пружною, а тіло - пружним.

Закон Гука: механічне напруження, яке виникає в тілі, прямо пропорційно відносній деформації.

$\sigma = \varepsilon E$ , де  $E$  – модуль Юнга.

Якщо відносна деформація  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ , а механічне напруження  $\sigma = \frac{F_{np}}{S}$ , то

$$\frac{F_{np}}{S} = E \frac{\Delta l}{l_0}, \quad F_{np} = \frac{SE}{l_0} \Delta l.$$

Отже можна записати закон Гука для сили пружності:

$$F_{np} = -k\Delta l$$

*Сила пружності, яка виникає в тілі, прямо пропорційна абсолютній деформації.*

*Фізичний зміст модуля Юнга*: модуль Юнга чисельно дорівнює механічному напруженню, яке виникає в тілі, при  $\varepsilon=1$ .

Модуль Юнга залежить від роду матеріалу.

**Сила тертя** — це непотенційна сила, яка протидіє рухові фізичного тіла, розсіюючи його механічну енергію в тепло.

За своєю фізичною природою сила тертя належить до електростатичних сил і не є фундаментальним типом взаємодії. В мікроскопічному світі сили тертя немає. Сила тертя виникає лише в макроскопічних системах, де внаслідок хаотичного руху атомів відбувається незворотній процес розсіювання енергії макроскопічного руху складових системи в енергію мікроскопічного руху атомів та молекул.

Сила тертя завжди направлена проти вектора швидкості. Сила тертя не належить до потенціальних сил.

Коли тіло пересувається на поверхні іншого тіла, сила тертя пропорційна силі реакції опори  $N$  з коефіцієнтом пропорційності  $\mu$ , який називається коефіцієнтом тертя:

$$F = \mu N.$$

### Архімедова сила. Закон Архімеда. Умови плавання тіл.

Закон Архімеда: на тіло занурене в рідину або газ, діє виштовхувальна сила, що дорівнює вазі рідини або газу в об'ємі, витісненому цим тілом.

$$F_A = \rho_p g V_T, \quad (4)$$

де  $\rho_p$  – густина тіла,  $g$  – прискорення вільного падіння,  $V_T$  – об'єм зануреного тіла.

#### Умови плавання тіл:

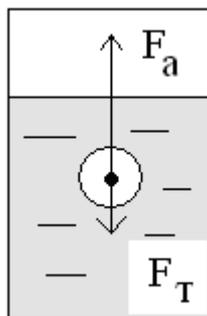
1. тіло спливає

$$F_A > F_T$$

$$F_A = \rho_p g V_T, F_T = m_T g = \rho_T g V_T$$

$$\rho_p g V_T > \rho_T g V_T,$$

$$\rho_p > \rho_T$$



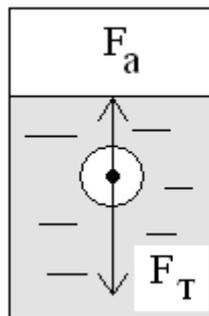
2. тіло тоне

$$F_A < F_T$$

$$F_A = \rho_p g V_T, F_T = m_T g = \rho_T g V_T$$

$$\rho_p g V_T < \rho_T g V_T,$$

$$\rho_p < \rho_T$$



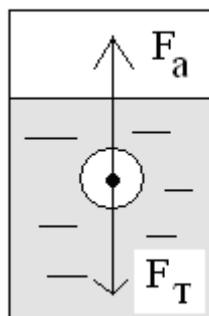
3. тіло плаває в будь-якому місці рідини (газу)

$$F_A = F_T$$

$$F_A = \rho_p g V_T, F_T = m_T g = \rho_T g V_T$$

$$\rho_p g V_T = \rho_T g V_T,$$

$$\rho_p = \rho_T$$



### Закон збереження імпульсу тіла

Закон збереження імпульсу - один із фундаментальних законів фізики, який стверджує, що у замкненій системі сумарний імпульс усіх тіл зберігається.

Якщо на систему тіл зовнішні сили не діють або вони врівноважені, то така система називається замкнутою, для неї виконується закон збереження імпульсу: повний імпульс замкнутої системи тіл залишається незмінним за будь-яких взаємодій тіл цієї системи між собою.

Доведення

Розглянемо систему із  $N$  тіл, які взаємодіють між собою. Силу, яка діє на  $i$ -те тіло з боку  $j$ -ого тіла позначимо  $\mathbf{F}_{ij}$ . Рівняння руху для кожного із  $N$  тіл

записуються у вигляді: 
$$\frac{d\mathbf{p}_i}{dt} = \sum_j \mathbf{F}_{ij}$$
, де  $\mathbf{p}_i$ - імпульс  $i$ -ого тіла.

Просумувавши усі рівняння, й враховуючи те, що за третім законом Ньютона  $\mathbf{F}_{ij} = -\mathbf{F}_{ji}$ , отримуємо: 
$$\frac{d}{dt} \sum_i \mathbf{p}_i = 0$$
, звідки  $\sum_i \mathbf{p}_i = \text{const}$ , тобто сумарний імпульс є інтегралом руху.

### Визначення механічної роботи

Робота - фізична величина, яка визначає енергетичні затрати при переміщенні фізичного тіла, чи його деформації.

Робота зазвичай позначається латинською літерою  $A$  (від нім. Arbeit), в англійській літературі -  $W$  (від англ. Work), й має розмірність енергії. У системі СІ робота вимірюється в Джоулях.

При малому переміщенні фізичного тіла  $\delta \mathbf{l}$  під дією сили  $\mathbf{F}$  говорять, що над тілом здійснюється робота  $\delta A = \mathbf{F} \cdot \delta \mathbf{l} = F \delta l \cos \theta$ , де  $\theta$  - кут між напрямком сили й напрямком переміщення.

Згідно з цією формулою роботу здійснює тільки складова сили, яка паралельна переміщенню. Сила, яка перпендикулярна переміщенню, роботи не здійснює.

У випадку, коли тіло рухається по криволінійному контуру  $C$ , для знаходження роботи потрібно проінтегрувати наведений вище вираз вздовж

$$A = \int_C \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l}$$

контур:

Якщо сила потенціальна, то робота залежить лише від різниці значень потенціалу в початковій і кінцевій точках і не залежить від траєкторії, по якій тіло рухалося між цими двома точками.

У термодинаміці при зміні об'єму тіла на величину  $dV$  під дією тиску  $P$  над тілом виконується робота  $dA = -PdV$ .

### Енергія

Енергія (від грец. ενεργός - діяльний) — загальна кількісна міра руху і взаємодії всіх видів матерії. Поняття енергії зв'язує всі явища природи в одне ціле, є загальною характеристикою стану фізичних тіл і фізичних полів.

У фізиці енергія зазвичай позначається латинською літерою  $E$ .

В системі СІ енергія вимірюється в джоулях.

Відповідно до різних форм руху матерії, розрізняють кілька типів енергії: механічна, електромагнітна, хімічна, ядерна, теплова, гравітаційна та ін. Цей поділ є досить умовним. Так хімічна енергія складається з кінетичної енергії руху електронів, їхньої взаємодії та взаємодії з атомами.

### Потужність механізмів

Потужність — робота, що виконана за одиницю часу, або енергія, передана за одиницю часу.

Зазвичай позначається латинською літерою P, вимірюється у Ватах. Іншою одиницею вимірювання, яка ще й досі широко використовується, є кінська сила.

$$P = \frac{dA}{dt}$$

Потужність є важливою характеристикою двигунів.

Якщо на рухоме тіло діє сила, то ця сила здійснює роботу. Потужність в цьому випадку рівна скалярному добутку вектора сили на вектор швидкості, з якою рухається тіло:  $p = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} = F \cdot v \cdot \cos \alpha$

F — сила, v — швидкість,  $\alpha$  — кут між вектором швидкості і сили.

Окремий випадок потужності при обертальному русі:

$$P = M \cdot \omega = \frac{\pi \cdot M \cdot n}{30}$$

M — момент,  $\omega$  — кутова швидкість,  $\pi = 3,14159265358979323\dots$  — число пі, n — частота обертання (число обертів за хвилину, об/хв).

**Потужність** — фізична величина, що дорівнює відношенню здійсненої роботи A до проміжку часу t, за який її було здійснено:  $P = \frac{A}{t}$ .  $[p] = \text{Дж/с} = \text{Вт}$ .

### Енергія універсальна міра руху тіл в природі

$$A = E_2 - E_1 = \Delta E$$

$$[A] = 1\text{Н} \cdot 1\text{м} = 1\text{Дж}$$

$$[E] = \text{Дж}$$

### Кінетична і потенціальна енергія

Кінетична енергія — частина енергії фізичної системи, яку вона має завдяки руху.

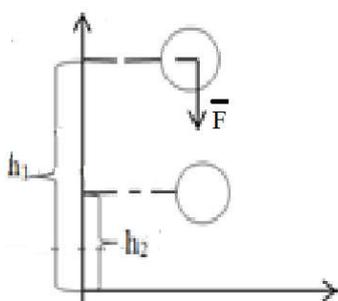
### Робота рухомих тіл

$$A = \vec{F} \cdot \vec{S}; \vec{F} = m \cdot \vec{a}; \vec{S} = \frac{\vec{V}^2 - \vec{V}_0^2}{2a}; A = m \frac{\vec{V}^2 - \vec{V}_0^2}{2};$$

$$A = \frac{m\vec{V}^2}{2} - \frac{m\vec{V}_0^2}{2} \text{ робота рухомого тіла } A = E_2 - E_1$$

$$E_k = \frac{m\vec{V}^2}{2} - \text{кінетична енергія рухомого тіла}$$

$$E_k = \frac{I\omega^2}{2} - \text{кінетична енергія обертального руху}$$



$$A = \frac{I\omega^2}{2} - \frac{I\omega_0^2}{2} - \text{робота обертального руху твердого тіла}$$

### Робота сили тяжіння

$$A = \vec{F} \cdot \vec{S}$$

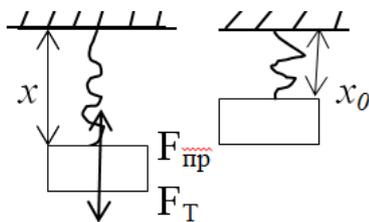
$$\vec{F}_T = m \cdot \vec{g}; \quad \vec{S} = \vec{h} = h_1 - h_2$$

$$A = -m \cdot \vec{g}(h_2 - h_1)$$

$$A = -\left(m \cdot \vec{g}h_2 - m \cdot \vec{g}h_1\right) \text{ робота сили тяжіння}$$

$$E = mgh \text{ потенціальна енергія (енергія взаємодії)}$$

### Робота сил деформації



$$A = \vec{F} \cdot \vec{S}$$

$$A = \vec{F}_{np} \cdot \vec{S}$$

$$A = \vec{F}_{np} \cdot (x - x_0)$$

$$\vec{F}_{np} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2}{2} = \frac{-kx - kx_0}{2} = \frac{-k}{2} \cdot (x + x_0)$$

$$A = \frac{-k}{2} \cdot (x + x_0) \cdot (x - x_0) = \frac{-k}{2} \cdot (x^2 - x_0^2) = -\left(\frac{kx^2}{2} - \frac{kx_0^2}{2}\right)$$

$$A = -\left(\frac{kx^2}{2} - \frac{kx_0^2}{2}\right) - \text{робота сили деформації}$$

$$E = \frac{kx^2}{2} - \text{потенціальна енергія деформованого тіла}$$

Потенціальна енергія — частина енергії фізичної системи, що виникає завдяки взаємодії між тілами, які складають систему, та із зовнішніми щодо цієї системи тілами, й зумовлена розташуванням тіл у просторі. Разом із кінетичною енергією, яка враховує не тільки положення тіл у просторі, а й рух, потенціальна енергія складає механічну енергію фізичної системи.

Потенціальна енергія матеріальної точки визначається як робота з її переміщення із точки простору, для якої визначається потенціальна енергія у якусь задану точку, потенціальна енергія якої приймається за нуль. Потенціальна енергія визначається лише для поля консервативних сил.

### Закон збереження енергії

Закон збереження енергії - закон, який стверджує, що повна енергія в ізольованих системах не змінюється з часом. Проте енергія може перетворюватися з одного виду в інший. Закон збереження енергії є, мабуть, найважливішим із законів збереження, які застосовуються в фізиці.

### Закон збереження механічної енергії

У механіці, закон збереження енергії твердить, що в замкненій системі часток, повна енергія, що є сумою кінетичної і потенціальної енергії не залежить від часу, тобто є інтегралом руху.

Закон збереження енергії справедливий тільки для замкнених систем, тобто за умови відсутності зовнішніх полів чи взаємодій.

Сили взаємодії між тілами, для яких виконується закон збереження механічної енергії називаються консервативними силами.

Закон збереження механічної енергії не виконується для сил тертя, оскільки за наявності сил тертя відбувається перетворення механічної енергії в теплову.

Еволюція механічної системи матеріальних точок з масами  $m_i$  за другим законом Ньютона задовольняє системі рівнянь  $m_i \dot{\mathbf{v}}_i = \mathbf{F}_i$ , де  $\mathbf{v}_i$  - швидкості матеріальних точок, а  $\mathbf{F}_i$  - сили, що діють на ці точки.

Енергія не виникає і не зникає вона переходить з одного виду в інший

$$(E_{k2} - E_{k1}) = -(E_{p2} - E_{p1});$$

$E_k$  – кінетична енергія

$E_p$  – потенціальна енергія

$$\Delta E_k = -\Delta E_p$$

### ККД механізмів

У реальних умовах частина механічної енергії завжди втрачається, оскільки йде на збільшення внутрішньої енергії двигуна та інших частин машини. Для того щоб характеризувати ефективність машин та пристроїв, користуються коефіцієнтом корисної дії.

$$\eta = \frac{A_{\text{кор.}}}{A_{\text{зат}}} \cdot 100\%$$

**Коефіцієнт корисної дії (ККД)** — це фізична величина, яка дорівнює відношенню корисної роботи до повної роботи. ККД позначається літерою  $\eta$  та вимірюється у процентах. Корисна робота завжди менша від повної. ККД завжди менший за 100 %.

Корисна робота ( $A_{\text{кор}}$ ) – це робота завдяки якій створено механізм.

Затрачена робота ( $A_{\text{зат}}$ ) – це робота завдяки якій працює механізм.

Багатовікова практика показує, що жоден із механізмів не дає виграшу в роботі. Ще стародавнім ученим було відоме **правило**, яке застосовували до всіх

механізмів: у скільки разів виграємо в силі, у стільки ж разів програємо у відстані.  
Це правило назвали «золотим правилом» механіки.

## Модуль 2. Механіка твердого тіла.

### Лекція №3. Механіка обертового руху твердого тіла. Механіка рідин і газів

План: 1. Кінематика обертового руху твердого тіла

2. Момент інерції матеріальної точк. Момент інерції твердого тіла

Момент сили і умови рівноваги тіла

3. Динаміка обертового руху твердого тіла

Основне рівняння динаміки обертового руху твердого тіла

4. Момент імпульсу твердого тіла та закон його збереження

5. Визначення тиску. Тверді тіла, їх характеристика; тиск твердих тіл;

6. Рідини, їх характеристики. Тиск рідин – гідростатичний тиск; Гази, їх характеристики. Тиск газу;

7. Закон Паскаля; Атмосферний тиск;

8. Рівняння нерозривності; Рівняння Бернуллі. Гідродинамічний тиск.

### Момент інерції

Момент інерції (одиниця виміру в системі СІ [кг м<sup>2</sup>]) — в фізиці є мірою інерції обертального руху, аналогічно масі для поступального.

Моментом інерції матеріальної точки відносно деякої осі є добуток маси цієї точки на квадрат відстані від її осі обертання.

$$\vec{I}_i = m_i \vec{r}_i^2$$

В загальному випадку, значення моменту інерції об'єкта залежить від його форми та розподілу маси в об'ємі: чим більше маси сконцентровано далі від центра мас тіла, тим більшим є його момент інерції. Також його значення залежить від обраної осі обертання.

Тверде тіло можна розглядати як систему з нескінченної кількості матеріальних точок, кожна з масою  $m_i$ . Якщо відстані від кожної точки до осі обертання дорівнюють  $r_i$ , то момент інерції тіла до вибраної осі визначається як:

$$I = \sum_i m_i r_i^2$$

За умов безперервного розподілення маси в тілі, потрібний перехід до інтегральної форми закону:  $I = \int r^2 dm$ , де елемент маси  $dm$  визначається за допомогою просторового розподілу густини  $\rho$ .

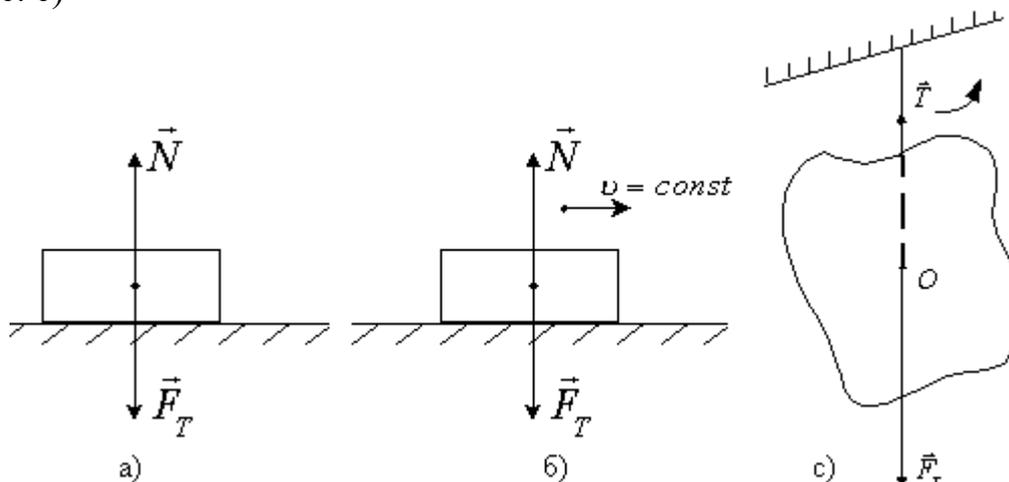
$$dm = \rho dV$$

Розділ механіки, в якому вивчаються умови рівноваги тіл, називається статикою.

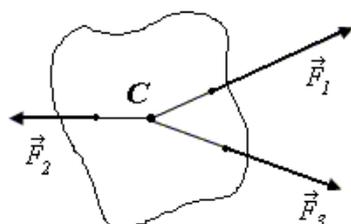
**Рівновагою тіла** називають такий стан, коли будь-яке прискорення тіла дорівнює нулю, тобто всі дії на тіло сил і моментів сил зрівноважені.

При цьому тіло може:

- знаходитись у стані спокою (рис. а);
- рухатись рівномірно і прямолінійно (рис. б);
- рівномірно обертатись навколо осі, яка проходить через центр його тяжіння (рис. с)



**Центром мас тіла** називають точку, через яку проходять сили, що змушують тіло рухатись поступально.



**Центром тяжіння тіла** називають точку прикладення сили тяжіння.

Якщо під дією сили тяжіння тіло рухається поступально, то центр мас і центр тяжіння співпадають.

### Види рівноваги.

Дослідити поведінку тіла на гладкій поверхні:



**Висновок:** Розрізняють три види рівноваги тіл:

- 1) **стійку рівновагу**, якщо тіло, будучи виведеним із положення рівноваги в сусіднє найближче положення і залишене в спокої, повернеться в це положення;
- 2) **нестійку рівновагу**, якщо тіло будучи виведеним із положення рівноваги в сусіднє положення і залишене в спокої, буде ще більше відхилятися від цього положення.
- 3) **байдужу рівновагу** - якщо тіло, будучи виведеним в сусіднє положення і залишене в спокої, залишиться в новому своєму положенні.

### Основний закон динаміки обертового руху

Будемо розглядати динаміку руху матеріальної точки по колу, та задачі, що виникають у зв'язку з розглядом цього питання. По-перше, згадаємо, що динаміка – це такий розділ механіки, який вивчає зв'язок між рухом досліджуємих тіл та силами, що діють на ці тіла. Тобто беруться до уваги причини, за яких цей рух відбувається. Машина, наприклад, рухається до гори, завдяки силі, що “надає” їй мотор.

В елементарній фізиці розглядається рух матеріальної точки – так називають тіла, розмірами яких можна знехтувати, по відношенню до розмірів системи, довжини траєкторії, тощо. Рух такого тіла можна зв'язати з рухом точки, що відповідає центру мас цього тіла.

Зв'язок між параметрами руху досліджуємого тіла та силами, що на це тіло діють, математично виражає II закон Ньютона:  $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ , де  $\vec{F}$ - сумарний добуток усіх сил, що діють на тіло,  $m$  - маса, а  $\vec{a}$  - прискорення тіла.

При рівномірному обертанні матеріальної точки по колу її прискорення є доцентровим і виражається формулою:  $a_c = \frac{v^2}{R}$ , де  $R$  – радіус кола, а  $v$  - лінійна швидкість матеріальної точки.

Зв'язок між такими параметрами обертального руху, як

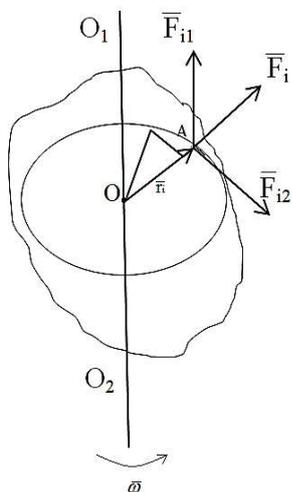
$\omega$  – колова швидкість руху;

$\nu$  – частота руху;

$T$  – період руху;

надають формули:  $\omega = 2\pi \cdot \nu$ ;  $\nu = \frac{1}{T}$ ;  $v = \omega \cdot R$ .

### Динаміка обертального руху твердого тіла.



$m_i$  – маса матеріальної точки A

$r_i$  – радіус вектор матеріальної точки A

Момент інерції матеріальної точки

**Моментом інерції матеріальної точки** відносно деякої вісі є добуток маси цієї точки на квадрат відстані від точки до вісі обертання.

$$\vec{I}_i = m_i r_i^2$$

**Момент інерції твердого тіла**

$$\vec{I}_n = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 \quad (\text{кг} \cdot \text{м}^2)$$

**Момент інерції твердого тіла** відносно деякої осі є сума моментів інерції усіх точок цього тіла відносно даної

вісі.

Розглянемо умову при якій одна точка  $m_i$  отримає прискорення при обертальному русі. Нехай на цю точку діє довільна сила  $F_i$ . Вона має дві складові. Складова сили  $F_{i1}$  паралельна вісі  $O_1O_2$ , тому вона не впливає на значення прискорення яке буде мати матеріальна точка. Ця складова створює тиск на вісь навколо якої обертається матеріальна точка.

$F_{i2}$  – це складова сили  $F_i$ , яка визначає значення тангенціального прискорення матеріальної точки і направлена по дотичній в цій точці.

За другим законом Ньютона

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

Другий закон для  $i$ -ї матеріальної точки  $\vec{F}_{i2} = m_i \cdot \vec{a}_\tau$ ;  $\vec{a}_\tau = \vec{\varepsilon} \cdot \vec{r}_i$

$$\vec{F}_{i2} = m_i \cdot \vec{\varepsilon} \vec{r}_i$$

Помножимо ліву і праву сторони рівняння на  $\vec{r}_i$

$$\vec{F}_{i2} \cdot \vec{r}_i = m_i \cdot \vec{\varepsilon} r_i^2; \quad \vec{F}_{i2} \cdot \vec{r}_i = \vec{I}_i \cdot \vec{\varepsilon}$$

$$\vec{F}_{i2} \cdot \vec{r}_i = \vec{I}_i \cdot \vec{\varepsilon}; \quad \vec{M}_i = \vec{F}_{i2} \cdot \vec{r}_i;$$

$$\vec{M}_i = \vec{I}_i \cdot \vec{\varepsilon}$$

**Другий закон Ньютона** для матеріальної точки твердого тіла.

Тверде тіло момент сили.

$$\vec{M}_i = \sum_{i=1}^{\infty} \vec{M}_i$$

$$\sum_{i=1}^{\infty} \vec{M}_i = \sum_{i=1}^{\infty} \vec{I}_i \cdot \vec{\varepsilon}$$

$$\vec{M} = \vec{I} \cdot \vec{\varepsilon}$$

**Основне рівняння динаміки обертового руху твердого тіла** (Другий закон Ньютона для обертового руху твердого тіла)

*Результуючий момент сил прикладених до твердого тіла дорівнює добутку моменту інерції твердого тіла на кутове прискорення, яке отримує тверде тіло під дією результуючого моменту сил.*

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}; \quad \vec{M} = \vec{I} \cdot \frac{d\vec{\omega}}{dt} \quad \vec{M} = \frac{d\vec{I}\vec{\omega}}{dt}$$

Момент інерції твердого тіла грає таку саму роль, як маса в механіці матеріальної точки

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt} \quad \text{рівняння динаміки обертового руху для твердого тіла.}$$

В обертовому русі твердого тіла момент інерції відіграє таку ж саму роль, як маса в поступальному русі.

*Момент кількості руху твердого тіла – добуток моменту інерції твердого тіла на кутову швидкість:*

$$\vec{L} = \vec{I}\vec{\omega} \quad [\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{рад/с}]$$

*Закон збереження моменту кількості руху твердого тіла: сума моментів кількості руху тіл до взаємодії дорівнює сумі моментів кількості руху – після взаємодії.*

$$\vec{L}_1 + \vec{L}_2 + \vec{L}_3 + \dots = \vec{L}'_1 + \vec{L}'_2 + \vec{L}'_3 + \dots = \text{const}$$

Закон збереження імпульсу - один із фундаментальних законів фізики, який стверджує, що у замкненій системі сумарний імпульс усіх тіл зберігається.

Якщо на систему тіл зовнішні сили не діють або вони врівноважені, то така система називається замкнутою, для неї виконується закон збереження імпульсу: повний імпульс замкнутої системи тіл залишається незмінним за будь-яких взаємодій тіл цієї системи між собою:

### Кінетична енергія обертового руху

Найбільш просто задачі механіки розв'язуються для матеріальних точок. Тому в цих випадках, коли не можна знехтувати формою та розмірами тіла, його в думці розбивають на невеликі елементи так, щоб кожний елемент можна було розглядати як матеріальну точку.

Таким чином, задача про рух твердого тіла зводиться до задачі про рух великого числа матеріальних точок (системи матеріальних точок).

Обертвим рухом твердого тіла називають такий рух при якому траєкторії всіх точок тіла являються колами, центри яких лежать на одній прямій, що називається віссю обертання.

Кінетична енергія характеризує стан руху тіла. Будь-який елемент маси обертового тіла має лінійну швидкість  $v$  і отже, він має кінетичну енергію. Кінетична енергія всього тіла буде дорівнювати сумі кінетичних енергій всіх елементів мас.

Наприклад: кінетична енергія для поступального руху  $E = \frac{m \cdot v^2}{2}$ ,

для обертового руху  $E = \frac{I \cdot \omega^2}{2}$ ,

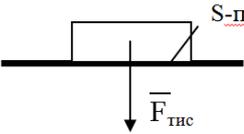
де  $\omega$  – кутова швидкість.

Кутова швидкість  $\omega$  - це фізична величина, яка показує як змінився кут повороту радіус вектора за одиницю часу:  $\vec{\omega} = \frac{d\phi}{dt}$  [рад/с], а

кутове прискорення  $\varepsilon$  – це фізична величина, яка показує як змінилась кутова швидкість матеріальної точки за одиницю часу:  $\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$  [рад/с<sup>2</sup>].

### Тиск.

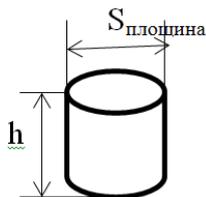
Тверді тіла зберігають форму і об'єм тому що, частинки із яких складаються тверді тіла – малорухомі (Вони виконують коливальний рух біля положення рівноваги і мають найбільші сили взаємодії між собою.



$P = \frac{F_{\text{тис}}}{S}$  - тиск

$[P] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 1 \text{ Па}$

Рідини зберігають об'єм, але не зберігають форми, це пов'язано з тим що частинки з яких складаються рідини – рухомі, але сили взаємодії між ними достатні, щоб зберігати об'єм.



$$P = \frac{F_{\text{тис}}}{S} = \frac{mg}{S} = \frac{\rho_{\text{рід.}} \cdot V \cdot g}{S} = \frac{\rho_{\text{рід.}} \cdot S \cdot g \cdot h}{S}$$

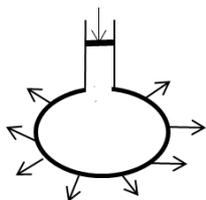
$P = \rho_{\text{рід.}} \cdot g \cdot h$  - тиск рідини - **гідростатичний тиск**.

Гази не зберігають ні форми, ні об'єму так як частинки газів рухомі і між ними дуже слабкі сили взаємодії.

Тиск газу – це сумарна дія молекул частинок на дно і стінки посудини в результаті теплового хаотичного руху.

Для визначення тиску газу використовуються манометри і водяні і металеві.

### Закон Паскаля



Тиск діючий на рідину або газ передається через кожен точку рідини або газу однаково, завдяки рухомості частинок.

Атмосферний тиск – створюється атмосферним повітрям висотою  $\approx 100$  км. Завдяки силі тяжіння найбільша густина повітря буде у поверхні Землі. З висотою густина зменшується. Так як атмосферне повітря не має чіткої границі і не має сталої густини, то неможливо отримати формулу для розрахунку тиску атмосфери.

Для визначення атмосферного тиску використовують ртутний барометр.

Нормальний атмосферний тиск.  $760 \text{ мм.рт.ст.} = 10^5 \text{ Па.}$

$1 \text{ мм рт.ст.} = 133,3 \text{ Па}$

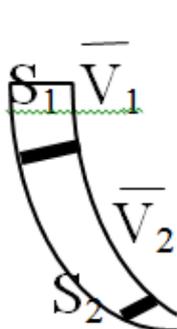
Сучасний прилад для визначення атмосферного тиску барометр-анероїд.

Атмосферний тиск с висотою змінюється. На кожні 10м висоти змінюється 1мм рт.ст.

### Рівняння нерозривності

#### Рівняння Бернуллі

Задача: які необхідно умови, щоб рідина яка рухається по трубопроводам, проходила від постачальника до споживача без втрат.



$$S_2 < S_1; V_2 > V_1$$

$S$  – площа перерізу трубопровода

$V$  – швидкість рідини на різних ділянках

**Нестислива рідина** – ідеалізована система рідини в якій густина в кожній точці залишається величиною сталою

$$\rho_1 = \rho_2 = \text{const}$$

## Рівняння нерозривності

Розглянемо перенос маси рідини по трубопроводу за один і той же проміжок часу.

$$\Delta m_1 = \Delta m_2$$

$$\begin{aligned} & \rho_1 V_1 = \rho_2 V_2 \\ & S_1 \bar{V}_1 \cdot t = S_2 \bar{V}_2 \cdot t \\ & S_1 \bar{V}_1 = S_2 \bar{V}_2 = S_3 \bar{V}_3 = \dots = S_n \bar{V}_n = \text{const} \end{aligned}$$

На кожній ділянці трубопроводу при русі нестисливої рідини добуток площини поперечного перерізу трубопроводу на швидкість речовини залишається сталою.

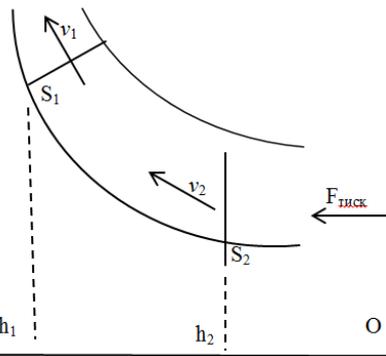
## Рівняння Бернуллі

Для того, щоб рідина по трубопроводам подавалась від постачальника до споживача без втрат, необхідно, щоб на кожній ділянці трубопроводу загальний тиск, який створюється рухомою рідиною (гідростатичний і гідродинамічний) та атмосферний тиск залишається величиною сталою.

Рівняння Бернуллі є наслідком закону збереження енергії. Якщо рідина не ідеальна, то її механічна енергія розсіюється і тиск вздовж трубопроводу, яким тече така рідина, спадає. Для реальної в'язкої рідини в правій частині рівнянь, слід додати величину втрат тиску  $\Delta p_{вт}$  на гідравлічний опір рухові.

Рівняння Бернуллі широко застосовують для розв'язання багатьох гідравлічних задач у нафтогазовій справі.

Розглянемо роботу яку необхідно виконати щоб перенести масу рідини по трубопроводу.



$A = A_1 - A_2$ , де  $A_1$  - робота зовнішніх сил по переміщенню рідини.

$A_2$  - робота внутрішніх сил опору рідини

$$A = (E_{k2} + E_{p2}) - (E_{k1} + E_{p1})$$

$$A_1 - A_2 = (E_{kr} + E_{pr}) - (E_{k1} + E_{p1})$$

$A$  - це змінна енергії

$$A_1 - F_{\text{тис.р}} \cdot V_2 \cdot t = \left( \frac{m_2 v_2^2}{2} + m_2 g h_2 \right) - \left( \frac{m_1 v_1^2}{2} \right)$$

$$F_{\text{тис.}} = p \cdot s$$

$$\begin{aligned} p_1 S_1 V_1 t - p_2 S_2 V_2 t &= \left( \frac{\rho_2 S_2 V_2 t V_2^2}{2} + \rho_2 S_2 V_2 t g h_2 \right) - \\ &- \left( \frac{\rho_1 S_1 V_1 t V_1^2}{2} + \rho_1 S_1 V_1 t g h_1 \right) \end{aligned}$$

$$\rho_1 = \rho_2$$

$$S_1 V_1 = S_2 V_2$$

$$p_1 - p_2 = \left( \frac{\rho V_2^2}{2} + \rho_2 g h_2 \right) - \left( \frac{\rho_1 V_1^2}{2} + \rho_1 g h_1 \right)$$

$$p_1 + \rho_1 g h_1 + \frac{\rho_1 V_1^2}{2} = p_2 + \rho_2 g h_2 + \frac{\rho_2 V_2^2}{2} = \text{const}$$

$$p_0 + \rho gh + \frac{\rho V^2}{2} = \text{const} -$$

### Властивості рідини

Рідина — один з основних агрегатних станів речовини поряд із газом та твердим тілом. Від газу рідина відрізняється тим, що зберігає свій об'єм, а від твердого тіла тим, що не зберігає форму.

Густиною рідини  $\rho$  називається її маса, яка міститься в одиниці об'єму,  $\text{кг/м}^3$ ,  $\rho = M/W$ , де  $M$  – маса рідини (кг) в об'ємі  $W$  ( $\text{м}^3$ ).

Питома вага однорідної рідини  $\gamma$ ,  $\text{Н/м}^3$ , називається вага  $G$  одиниці об'єму цієї рідини  $\gamma = G/W$ .

В'язкість рідини. Всі реальні рідини мають певну в'язкість, яка проявляється у вигляді внутрішнього тертя при відносному переміщенні суміжних частинок рідини. В'язкість рідини – це її властивість чинити опір відносному зрушенню частинок.

Поверхневий натяг рідини, який зумовлений силами взаємодії молекул поверхневого шару рідини між собою і молекулами газу, намагається скоротити вільну поверхню рідини. Внаслідок цього рідина, що має криволінійну поверхню, зазнає додаткового зусилля, яке збільшує або зменшує тиск в рідині на величину,

## Модуль 3. Основи МКТ. Термодинаміка.

### Лекція №4. Основи молекулярно – кінетичної теорії Ідеальний газ. Газові закони - 2 год.

*План:* 1. Основні положення МКТ

2. Основне рівняння МКТ газів

3. Шкала Цельсія.

4. Рівняння Больцмана. Шкала Кельвіна.

5. Рівняння стану ідеального газу – рівняння Менделєєва-Клайперона.

6. Ізопроееси у природі (газові закони) Процес ізобарний (Закон Гей-Люссака)

7. Процес ізохорний (Закон Шарля)

8. Процес ізотермічний (Бойля – Маріотта). Процес адіабатичний (Пуассона)

#### Основні положення МКТ

Молекулярна фізика вивчає тепловий рух. Тепловий рух зумовлює внутрішні властивості тіл, і його вивчення дає змогу зрозуміти багато фізичних процесів, які відбуваються в тілах.

Мета МКТ – пояснення властивостей макроскопічних тіл і теплових процесів, що відбуваються в них, на основі уявлень про те, що всі тіла складаються з окремих частинок, які рухаються хаотично.

Молекулярна фізика вивчає тепловий рух. Тепловий рух зумовлює внутрішні властивості тіл, і його вивчення дає змогу зрозуміти багато фізичних процесів, які відбуваються в тілах.

Мета МКТ – пояснення властивостей макроскопічних тіл і теплових процесів, що відбуваються в них, на основі уявлень про те, що всі тіла складаються з окремих частинок, які рухаються хаотично.

Основні положення МКТ речовини:

1. Будь-які речовини мають дискретну (переривчасту) будову. Вони складаються з найдрібніших частинок молекул і атомів.

Підтвердженням дискретності є прокатка, кування металу, отримання 1974 року фотографії окремих молекул і атомів, розчинність речовин тощо.

Молекули - найменші частинки, які мають хімічні властивості речовини. Молекули складаються з більш простих частинок - атомів хімічних елементів. У природі є 92 хімічні елементи. Разом із штучними наразі налічується 108 елементів.

Речовину, яка побудована з атомів лише одного виду, називають елементом (водень, кисень, азот тощо). Кожен елемент має свій номер  $Z$  в таблиці Менделєєва. Число  $Z$  визначає кількість протонів у ядрах атомів і електронів, що рухаються в атомі навколо ядра.

2. Молекули знаходяться в стані неперервного хаотичного (невпорядкованого) руху, що називається тепловим і у загальному випадку є сукупністю поступального, обертального і коливального рухів.

Під час нагрівання речовини швидкість теплового руху і кінетична енергія його частинок збільшуються, а під час охолодження зменшуються. Ступінь нагрітості тіла характеризує його температура, яка є мірою середньої кінетичної енергії хаотичного поступального руху молекул цього тіла.

3. Молекули взаємодіють одна з одною із силами електромагнітної природи, причому на великих відстанях вони притягуються, а на малих - відштовхуються. Сили притягання і відштовхування між молекулами діють постійно.

Молекули різних речовин по-різному взаємодіють одна з одною. Ця взаємодія залежить від типу молекул і відстані між ними. Залежно від характеру руху і взаємодії молекул розрізняють три стани речовини: твердий, рідкий, газоподібний (плазма).

**Основні положення молекулярно-кінетичної теорії (МКТ) будови речовини:**

1. всі тіла в природі складаються із окремих частинок між якими відстань.

2. частинки неперервно хаотично рухаються, мають кінетичну енергію

$$E_{ко} = \frac{m_0 V_0^2}{2}$$

3. всі частинки між собою взаємодіють силами взаємопритягання і взаємного відштовхування

$$E_{ро} \neq 0$$

**Кількість речовини**

$$\nu = \frac{m}{\mu}, \nu = \frac{N}{N_A}$$

$$\nu = \frac{m}{\mu} = \frac{N}{N_A} \Rightarrow N = \frac{m}{\mu} \cdot N_A$$

**Концентрація молекул** – це число молекул в одиниці об'єму

$$n = \frac{N}{V} \quad [n] = \text{лм}^3$$

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

**Макропараметри** це такі параметри які можна визначити за допомогою фізичних приладів. Наприклад температуру – термометром, тиск – барометром, масу – терезами. Макропараметри описують стан макросистеми.

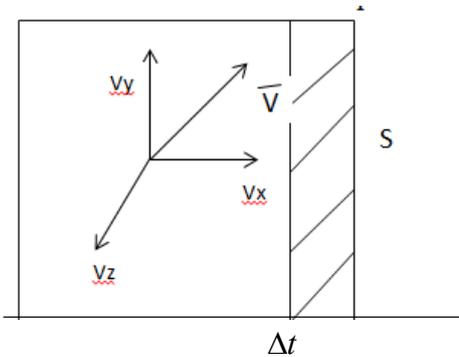
Параметри, які неможливо визначити за допомогою фізичних приладів називаються **мікропараметрами**

$m_0$  – маса молекули

$V_0^2$  – середня квадратична швидкість молекули

### Основне рівняння МКТ газів визначення тиску газів

Визначимо тиск газу. Для цього розглянемо дію газу на поршень враховуючи закон Паскаля.



$$P = \frac{F_{\text{тиск}}}{S}$$

1. Знайдемо силу тиску однієї молекули на поршень  $S$ . Удар молекули на поршень буде абсолютно пружним

$$\vec{V}_{x1} = -\vec{V}_{x2}$$

$$F_{\text{тиск}} \cdot \Delta t = m_0 V_{x2} - (-m_0 V_{x1})$$

$$F_{\text{тиск}} \cdot \Delta t = 2m_0 V_x : \quad F_{\text{тиск}} = \frac{2m_0 V_x}{\Delta t}$$

2. Визначимо кількість молекул які за час  $\Delta t$  будуть діяти на поршень площиною  $S$

$$N = n \cdot V$$

По теорії ймовірності так, як молекули рухаються хаотично тільки половина цих молекул за час буде рухатись до поршня

$$z = \frac{1}{2} N = \frac{1}{2} n V \quad V = S \frac{V_x}{\Delta t}$$

3. знайдемо загальну силу тиску молекул на поршень за  $\Delta t$

$$F_{\text{мис}} = \frac{2m_0V_x}{\Delta t} z = \frac{2m_0V_x}{\Delta t} \cdot \frac{1}{2} nSV_x \Delta t = m_0V_x^2 nS$$

4. знайдемо тиск газу

$$P = \frac{F_{\text{мис}}}{S} = \frac{m_0V_x^2 nS}{S} = m_0V_x^2 n$$

$$P = \frac{1}{3} m_0 n \vec{V}_0^2$$

Дане рівняння називається **основним рівнянням МКТ**, тому що воно являється зв'язуючим містком між макро і мікро системами. Враховуючи що

$$E_{\text{к0}} = \frac{m_0V_0^2}{2} \quad \text{отримуємо} \quad P = \frac{2}{3} nE_{\text{к0}}$$

**Шкала Цельсія** характеризує життєдіяльність живих організмів, так як вони на 70-80% складаються з із води для якої 0°C – температура зміни агрегатного стану.

**Досліди Больцмана.** Балони з воднем, киснем, водою помістили в льод при температурі 0°C. Через деякий час в балонах встановиться однакова температура. Знайдемо співвідношення:

$$\frac{P_1V_1}{N_1} = \Theta_1, \quad N_1 = \frac{m_1}{\mu} N_A, \quad \frac{P_1V_1}{N_1} = \frac{P_3V_3}{N_3} = \Theta_1$$

В результаті досліда з'ясувалось, що у всіх балонах співвідношення добутку тиску і об'єму до числа молекул величина стала. Ті ж балони були розміщені при температурі + 100°C.

$$\frac{P_1V_1}{N_1} = \frac{P_2V_2}{N_2} = \frac{P_3V_3}{N_3} = \Theta_2$$

$$\Theta \sim T$$

$$\Theta = kT$$

енергетична температура

$$k = \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{T_2 - T_1},$$

k – постійна Больцмана

$$\frac{PV}{N} = kT$$

$$P = \frac{N}{V} kT,$$

**Рівняння Больцмана**

$$P = nkT$$

Дане рівняння показує як температура впливає на тиск газу

$$P = \frac{2}{3} nE_{\text{к0}}; \quad P = nkT; \quad \frac{2}{3} nE_{\text{к0}} = nkT$$

$\frac{2}{3} n \frac{m_0 V_0^2}{2} = nkT$  ; після скорочення  $V_0 = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$  – швидкість молекули і її залежність від температури.

$T=0K \quad V=0m/c$

$T = 0K \Rightarrow t^0 = -273^0 C$

**Температурна шкала Кельвіна** характеризує енергетичний стан тіл в природі, так як при  $T=0K$  (абсолютного нуля температур) рух частинок повинен зупинитися  $V=0m/c$ , то наступить енергетичний стан речовин в природі

$E_{ко} = 0 ; E_{ро} = 0 ; V = 0$

Кельвін (позначення К) — одиниця температури в системі СІ, одна з семи основних одиниць цієї системи.

Кельвін, згідно з міжнародною угодою, визначається двома точками: абсолютним нулем та потрійною точкою води. Абсолютний нуль температури, за визначенням, дорівнює точно 0 К та -273,15 °С. При абсолютному нулі температури весь кінетичний рух часток матерії припиняється (в класичному розумінні) і, таким чином, матерія не має теплової енергії. Потрійній точці води, також за визначенням, призначається температура 273,16 К та 0,01 °С. Наслідком таких визначень двох опорних точок абсолютної термодинамічної шкали є:

-один кельвін дорівнює точно 1/273,16 часткам температури потрійної точки води;

-один кельвін точно дорівнює одному градусу Цельсія;

-різниця між двома температурними шкалами дорівнює точно 273,15 кельвіна.

Деякі важливі точки температурної шкали, що стосуються кельвіна, наведені в табл.:

Точка	Температура		
	Кельвін	Градус Цельсія	градус Фаренгейта
Абсолютний нуль (точно за визначенням)	0 К	-273,15 °С	-459,67 °F
Точка замерзання води	273,15 К	0 °С	32 °F
Потрійна точка води	273,16 К	0,01 °С	32,018 °F
Точка кипіння води <sup>1</sup>	373,1339 К	99,9839 °С	211,9710 °F

З точки зору молекулярно - кінетичної теорії ідеальним газом називається газ, що складається з молекул, які можна вважати матеріальними точками, потенціальною енергією взаємодії таких молекул можна знехтувати і взаємодію молекул можна розглядати як зіткнення пружних куль.

Ідеального газу в природі не існує. Існують тільки реальні гази. Реальний газ можна вважати ідеальним при низьких тисках і невеликих температурах.

**Ідеальний газ**– це фізична модель реального газу в якому частинки газу знаходяться на великих відстанях між собою, тому взаємодією їх можна знехтувати  $E_{po} = 0$ , частинки приймаються як абсолютно пружні матеріальні точки, частинки приймають участь в тепловому хаотичному русі

$$E_{ko} \neq 0$$

### Рівняння стану ідеального газу

Встановимо залежність між параметрами які характеризують стан газу: P, V, T, m

З рівняння Больцмана

$$P = nkT ;$$

$$P = \frac{N}{V} kT = \frac{m}{\mu} \cdot N_A k \frac{1}{V} T \Rightarrow PV = \frac{m}{\mu} \cdot N_A kT$$

$$R = N_A k = 8,31 \text{ Дж/моль К} - \text{універсальна газова стала}$$

**Стан ідеального газу описується рівнянням Менделєєва-Клапейрона**

$$PV = \frac{m}{M} RT ,$$

де P – тиск газу, V – його об'єм, T – температура газу, m – маса газу, M – молярна маса, яка дорівнює масі одного моля речовини і в СІ вимірюється у кілограмах на моль у мінус першому степені.

Об'єм одного моля ідеального газу при норм, умовах (p = 760 мм рт. ст. = 101,325 кПа, t=0°C) дорівнює 0,0224м<sup>3</sup> /Моль;

R = 8,314510 Дж/(моль К). R – універсальна газова стала.

### Ізопроееси у природі (газові закони)

Якщо в газі відбуваються якісь процеси, то звичайно змінюються всі три його параметри: p, V і T. Природно, що найпростішими є процеси, які відбуваються зі зміною лише двох параметрів, а третій залишається сталим. Ці процеси дістали назву ізопроеесів (від грецького «ісос» — рівний, однаковий). Рівняння стану газу для них легко дістати з рівняння Клапейрона, вважаючи один з параметрів сталою величиною. **Розглянемо ізопроееси при умові що маса газу стала величина.**

Процес, що відбувається при сталій величині одного з параметрів газу називають ізопроеесом.

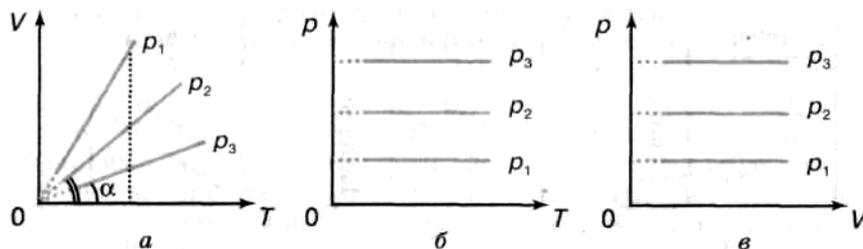
**Процес, що відбувається при постійному тиску називають ізобарним (Закон Гей- Люссака)**

**Ізобарний процес** (від грец. ísos — рівний, báros — вага) — термодинамічний процес, який відбувається при сталому тиску. Прикладом ізобарного процесу може бути нагрівання води у відкритій посудині, або розширення газу у циліндрі з поршнем, який може вільно пересуватися. В обох випадках тиск дорівнює атмосферному.

При ізобарному процесі об'єм ідеального газу прямопропорційний температурі (див. Закон Гей-Люссака).

На графіках процес зображується лініями, які називаються ізобарами. Для ідеального газу вони є прямими у всіх діаграмах, які пов'язують параметри  $T$  (температура),  $V$  (об'єм) і  $P$

$$P = \text{const}, \quad m = \text{const}, \quad \frac{V}{T} = \text{const}$$



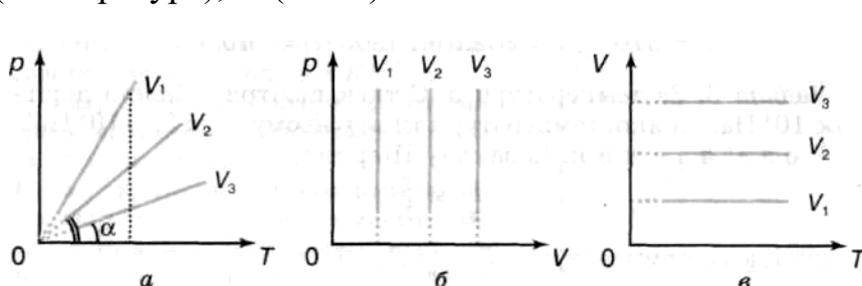
Процес,

**що відбувається при постійному об'ємі – ізохорним (Закон Шарля)**

ізохорний процес — це термодинамічний процес, який відбувається при сталому об'ємі. У газах та рідинах здійснюється дуже просто. Для цього досить нагрівати (охолоджувати) речовину у посудині, яка не змінює свого об'єму.

При ізохоричному процесі тиск ідеального газу прямопропорційний його температурі (див. Закон Шарля). У реальних газах закон Шарля не виконується, так як частина теплоти, яку отримує система, витрачається на збільшення енергії взаємодії частинок.

На графіках зображується лініями, які називаються ізохорами. Для ідеального газу вони є прямими у всіх діаграмах, які пов'язують параметри  $T$  (температура),  $V$  (об'єм) і  $P$



$$V = \text{const}, \quad m = \text{const}, \quad \frac{P}{T} = \text{const}$$

**Процес, що відбувається при постійній температурі називається ізотермічним і описується рівнянням Бойля – Маріотта.**

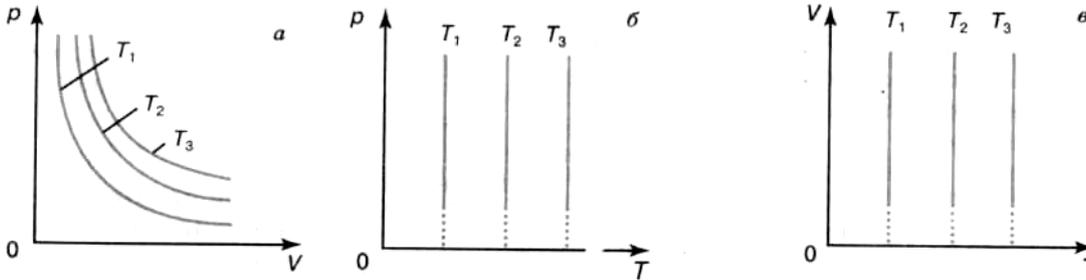
Ізотермічний процес відбувається достатньо повільно для того, щоб температура підтримувалася сталою завдяки теплообміну із середовищем. При ізотермічному стисненні тіло віддає тепло в середовище, при ізотермічному розширенні — вбирає тепло із середовища.

Згідно з рівнянням стану ідеального газу (або рівняння Клапейрона-Менделєєва), характеристики ідеального газу задовільняють рівність

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

де  $p$  — тиск,  $V$  — об'єм,  $m$  — маса,  $T$  — температура газу відповідно,  $\mu$  — молярна маса газу,  $R$  — газова стала.

$$T = \text{const}, m = \text{const}, PV = \text{const}$$



Процес, що відбувається без теплообміну між газом і навколишнім середовищем ( $Q=0$ ), називається адіабатичним і описується рівнянням Пуассона

$$PV^\gamma = \text{const},$$

де постійна для кожного стану газу величина  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ , коефіцієнт Пуассона, є відношення молярної теплоємності газу при ізобарному процесі, до молярної теплоємності газу при ізохорному процесі.

**Молярна теплоємність газу** вимірюється кількістю теплоти, що необхідна для нагрівання одного моля газу на один Кельвін і залежить від умов нагрівання.

$C_p > C_v$  тому, що кількість тепла яка надається при ізобарному процесі іде не тільки на збільшення внутрішньої енергії газу, а і на виконання роботи проти зовнішніх сил в процесі розширення. При цьому

$$C_p = C_v + R,$$

де  $R$  – універсальна газова стала.

**Цей вираз називають формулою Майєра.**

З молекулярно – кінетичної теорії відома формула для визначення  $C_v$  і  $C_p$  для ідеального газу.

$$C_v = \frac{i}{2}R, \quad C_p = \frac{i+2}{2}R,$$

### Лекція №5. Основи термодинаміки Теплові машини - 2 год.

План:

1. Внутрішня енергія тіл
2. Внутрішня енергія ідеального газу
3. Способи зміни внутрішньої енергії
4. Види теплопередачі в природі..
5. Робота в термодинаміці. Фізичний зміст універсальної газової сталої
6. Перший закон термодинаміки
7. Перший закон термодинаміки в ізопроцесах
8. Другий закон термодинаміки
9. Третій закон термодинаміки. Робота теплових двигунів
10. Цикл Карно. ККД теплових двигунів

Термодинамічний метод, як на це було вказано вище, досліджує

термодинамічні системи не цікавлячись їх будовою. З точки зору термодинаміки термодинамічною системою називається макроскопічна система, що вивчається методами термодинаміки. Всі тіла, не включені в термодинамічну систему, називаються зовнішнім середовищем.

Основним поняттям при вивченні термодинамічних систем є внутрішня енергія.

Внутрішня енергія тіла (позначається як  $E$  або  $U$ ) — повна енергія термодинамічної системи за винятком її кінетичної енергії як цілого і потенціальної енергії тіла в полі зовнішніх сил. Внутрішня енергія складається з кінетичної енергії хаотичного руху молекул, потенціальної енергії взаємодії між ними і внутрішньомолекулярної енергії.

Внутрішня енергія є однозначною функцією рівноважного стану системи. Це означає, що кожний раз, коли система опиняється в даному рівноважному стані, її внутрішня енергія приймає властиве цьому стану значення, незалежно від передісторії системи. Отже, зміна внутрішньої енергії при переході з одного стану в інший буде завжди дорівнювати різниці значень в цих станах, незалежно від шляху, по якому здійснювався перехід. Внутрішню енергію тіла не можна виміряти напряму. Можна визначити тільки зміну внутрішньої енергії.

**Внутрішня енергія тіл** – це сума кінетичних енергій руху та потенціальних енергій взаємодії частинок із яких складається тіло

$$U = \sum_{i=1}^{\infty} E_{ki} + \sum_{i=1}^{\infty} E_{pi}$$

### Внутрішня енергія ідеального газу

Внутрішня енергія ідеального газу

$$U = \sum_{i=1}^{\infty} E_{ki}$$

$$U = \frac{1}{2} \frac{m}{M} RT$$

де  $i$  – число ступенів вільності молекули ідеального газу.

**Числом ступенів вільності молекули** є число мінімальної кількості координат, що повністю визначають положення молекули в просторі.

Для одноатомного газу  $i = 3$ ; для двоатомного  $i = 5$ ; для трьохатомного і багатоатомного  $i=6$ .

Зміна внутрішньої енергії

$$\Delta U = U_2 - U_1$$

$$\Delta U = \frac{1}{2} \frac{m}{M} R \Delta T$$

**Існує два способи зміни внутрішньої енергії:**

1. Теплопередача
2. Виконання роботи системою або над системою.

### Види теплопередачі

Теплопровідність — це передача теплоти від більш нагрітих частин тіла до менш нагрітих, зумовлена хаотичним рухом мікрочастинок речовини. Теплопровідність супроводжується передачею внутрішньої енергії від більш нагрітих до менш нагрітих тіл без перенесення речовини.

### **Кількість теплоти.**

Кількість теплоти або кількість тепла - фізична величина, яка характеризує процеси обміну енергії між тілами.

Позначається зазвичай літерою  $Q$ , має розмірність енергії. В системі СІ вимірюється в Джоулях.

Конвекція — теплообмін у рідинах та газах, який супроводжується перенесенням речовини.

Променевий теплообмін — процес перенесення внутрішньої енергії від одного тіла до іншого внаслідок випускання, поширення та поглинання випромінювання.

$Q = \pm cm\Delta T$  - кількість теплоти при нагріванні та охолодженні;

$Q = \pm \lambda m$  - кількість теплоти при плавлінні та кристалізації;

$Q = \pm Lm$  - кількість теплоти при пароутворенні та конденсації.

Кількість теплоти це фізична величина, що є мірою зміни внутрішньої енергії в процесах, що не супроводжуються виконанням роботи, в процесах де хаотичний рух переходить від одних тіл в хаотичний рух інших, від однієї частини системи до іншої без виконання роботи.

### **Робота в термодинаміці.**

Робота і теплота це дві форми зміни внутрішньої енергії термодинамічних систем. Роботою називається фізична величина, що характеризується зміною внутрішньої енергії термодинамічної системи за рахунок реміщень макрочастинок системи або всієї системи в цілому. В подальшому розглядається тільки такі процеси, в яких внутрішня енергія визначається тільки її внутрішнім станом.

Уявімо собі, що газ знаходиться у вертикальному циліндрі, який закрито нерухомим поршнем площею  $S$ . Нехай під дією прикладеної зовнішньої сили  $F$  поршень опустився на відстань  $\Delta x$ , та стиснув при цьому газ. Газ буде стискатися до тих пір, доки сила  $F$  не врівноважиться силою, що діє на поршень зі сторони газу і дорівнює  $pS$ , де  $p$  – тиск газу (якщо переміщення маленьке, то тиск газу можна вважати сталим). Робота газу ( $A$ ) при цьому визначається так

$$F\Delta x = pS\Delta x \quad A = p\Delta V$$

Якщо газ стискався, то  $\Delta V < 0$  - робота газу від'ємна; якщо газ розширювався, то  $\Delta V > 0$  - додатна.

### **$A = p\Delta V$ - робота в термодинаміці**

Таким чином, якщо над газом скоюють додатну роботу, то зовнішні тіла передають йому частину своєї енергії. При розширенні газу, навпаки, робота зовнішніх сил від'ємна.

**Фізичний зміст універсальної газової сталої: універсальна газова стала  $R$  чисельно дорівнює роботі розширення 1 моля ідеального газу при ізобарному нагріванні його на 1К.**

Враховуючи два способи зміни внутрішньої енергії робимо висновок який відображається в першому законі термодинаміки.

## Перший закон термодинаміки

Термодинамічний метод, як на це було вказано вище, досліджує термодинамічні системи не цікавлячись їх будовою. З точки зору термодинаміки термодинамічною системою називається макроскопічна система, що вивчається методами термодинаміки. Всі тіла, не включені в термодинамічну систему, називаються зовнішнім середовищем.

Основним поняттям при вивченні термодинамічних систем є внутрішня енергія. Перший закон термодинаміки стверджує: існує внутрішня енергія термодинамічної системи - така однозначна функція параметрів її стану, зміна якої дорівнює роботі, виконаній над системою та кількості підведеної теплоти.

Перший закон термодинаміки за своїм змістом є закон збереження і перетворення енергії в теплових процесах. Він відповідає на питання скільки куди і в якій кількості та якості передано внутрішньої енергії термодинамічної системи.

$$\Delta U = A + Q$$

$$dU = dA + dQ$$

Зміна внутрішньої енергії в системі відбувається завдяки виконанню роботи над системою або системою і теплопередачам.

### Перший закон термодинаміки в ізопроцесах

Процеси, які відбуваються за незмінного значення одного з параметрів ідеального газу сталої маси  $m$  і молярної маси  $\mu$  називають ізопроцесами. Оскільки жоден із параметрів газу не може бути строго фіксованим, то ізопроцес — це ідеалізована модель стану ідеального газу.

#### 1. Ізотермічний процес

$$T = \text{const}, \quad T_1 = T_2$$

$$\Delta U = \frac{1}{2} \frac{m}{M} R \Delta T \quad \Delta T = 0 \quad \Delta U = 0$$

$A = Q$  система виконує роботу в результаті теплопередачі

#### 2. Ізобарний процес

$$P = \text{const}, \quad P_1 = P_2 \quad \Delta P = 0$$

$\Delta U = A + Q$  -перший закон термодинаміки виконується в повному обсязі.

#### 3. Ізохорний процес

$$V = \text{const}, \quad V_1 = V_2 \quad \Delta V = 0$$

$$A = -p\Delta V \text{ робота}$$

$$A = 0$$

$\Delta U = Q$  Зміна внутрішньої енергії системи відбувається завдяки теплопередачі.

#### 4. Адіабатичний процес

$$Q = 0$$

$\Delta U = A$  система може виконувати роботу завдяки зміни внутрішньої енергії

$T_1 > T_2$ ,  $t$  – час,  $T_1 = T_2$

В результаті термодинамічної рівноваги через деякий час система буде мати однакову температуру і не зможе виконувати роботу.

Висновок: Неможливо створити двигун першого роду.

### Другий закон термодинаміки:

**Теплові процеси в природі не обернені. Гаряче тіло може передавати енергію холодному тілу, а оберненого процесу не існує.**

**На основі другого закону термодинаміки неможливо створити двигун другого роду.**

Існують декілька якісних формулювань другого закону термодинаміки які є рівноцінними та впливають одне з одного:

1 Неможлива самодовільна передача теплоти від тіла менше нагрітого до тіла більше нагрітого. (Р. Клаузиуса)

2 Неможливий замкнений процес, єдиним результатом якого було б виконання роботи за рахунок охолодження одного тіла або неможливий вічний двигун другого роду (*perpetuum mobile II*), тобто двигун, що міг би працювати, наприклад, за рахунок споживання внутрішньої енергії світового океану без холодильника. (В. Томсон, М. Планк)

3 Неможливо створити цикл, ККД якого був би рівним або більшим за сто відсотків.

Перше формулювання є майже очевидним і підтверджується практикою та досвідом. В холодильних машинах тепло передається від менш нагрітих тіл до більш нагрітих, але це відбувається за рахунок роботи супутнього процесу, а не самодовільно. Відносно другого формулювання необхідно відмітити, що в ізотермічному процесі все тепло перетворюється в роботу, але замкненим ізотермічний процес не може бути.

Друге формулювання впливає з першого і навпаки. Дійсно, якщо б була можливість самодовільно передавати енергію від менш нагрітого тіла до більш нагрітого, то був би можливим, наприклад цикл Карно, в якому за рахунок отриманої від нагрівача за температури  $T_1$  кількості теплоті  $Q_1$  була б виконана робота  $A=Q_1-Q_2$ , де  $Q_2$ - кількість теплоти, відданої холодильнику з температурою  $T_2 < T_1$ . Після цього від холодильника теплота  $Q_2$  передається до нагрівача і робота виконується тільки за рахунок охолодження нагрівача.

Третє формулювання означає, що вся теплота повинна перетворюватись в роботу, або навіть отримана робота буде більшою за кількість отриманої робочим тілом від нагрівача теплоти, що суперечить і першому і другому формулюванням другого закону термодинаміки.

### Третій закон термодинаміки

**Третій закон термодинаміки неможливо досягти абсолютного 0 температури так як неможливо повністю зупинити рух частинок з яких складається тіло.**

### Теплові двигуни

Тепловою називають машину, в якій відбувається взаємоперетворення теплової енергії і механічної роботи. За своїм призначенням теплові машини поділяються на три основних типи: теплові двигуни, теплові насоси та холодильні машини. Термічний ККД теплового двигуна є відношення роботи, яку дістали в результаті здійснення прямого оборотного циклу, до теплоти, підведеної до робочого тіла від нагрівника

**Робота теплової машини основна на першому законі термодинаміки**  
**Кількість теплоти яка виділяється при згоранні палива йде на виконання робочого ходу теплової машини і на зміну внутрішньої енергії системи**

$$Q_1 = A + \Delta U$$

**Нагріте тіло**  $Q_1$

**Робоче тіло**  $A = Q_1 - Q_2$

**Холодильник**  $Q_2$

Нагрівач  $Q_1$  - кількість теплоти нагрівача

Робоче тіло –  $A = Q_1 - Q_2$  корисна робота теплонагрівача

Холодильник  $Q_2$  -кількість теплоти холодильника

Для того щоб тепловий двигун міг виконувати поставлену задачу в кінці кожного процесу повинна спрацювати система охолодження яка забере енергію що пішла на нагрівання системи, для того щоб перевести в початковий стан .

**Цикл Карно для опису роботи ідеальної теплової машини .**

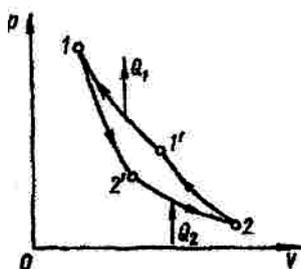
Основне завдання, яке поставив собі за мету Карно, полягало у визначенні параметрів, від яких залежить ККД теплової машини. При цьому він продемонстрував по-справжньому науково-теоретичний підхід, тому що намагався визначити ККД машини незалежно від "якогось механізму", "якогось певного агента", тобто пропонував розглянути ідеальну теплову машину. Особливістю цієї ідеальної машини було те, що всі зміни в ній повинні були відбуватися оборотним шляхом.

Оборотним називається процес, що може йти як у прямому, так і у зворотному напрямку, і після повернення системи у вихідний стан вона (система) залишається незмінною. Будь-який інший процес називається необоротним. Виявляється, якщо виключити з розгляду явища, що відбуваються в мікросвіті, то в природі абсолютно оборотних процесів не існує. Ще Лазар Карно звернув увагу на те, що для досягнення найвищого ККД при побудові й експлуатації механічного пристрою потрібно звести до мінімуму удари, тертя, іншими словами, усі процеси, що призводять до втрати "живої сили". Сад і Карно обґрунтовує свою теорію, розглядаючи процес одержання руху з тепла на основі загальних міркувань, нехтуючи різноманітними несуттєвими факторами у функціонуванні машини. Він намагається визначити, від чого залежить максимальний ККД машини. Тому і бере для розгляду ідеалізовану машину, істотною особливістю процесу якої є циклічний й оборотний характер. Як робоче тіло Карно використовує повітря, щоб уникнути складностей, пов'язаних зі зміною фази — перетворенням води на пару, а потім пари — на воду. Більше того, Карно приходиться до вірного висновку: для підвищення ККД треба уникати прямих контактів між нагрівачем і

холодильником, щоб жодна зміна температури не була зумовлена прямими потоками тепла між двома тілами, які мають різну температуру. Ці потоки не виконують ніякої механічної роботи й призводять до зниження ККД.

**Цикл Карно** — термодинамічний цикл, який складається з двох ізотермічних процесів і двох адіабатних процесів, що поперемінно чергуються між собою. Названий за ім'ям Н. Л. С. Карно, французького вченого та інженера, котрий вперше його описав у своїй праці «Про рушійну силу вогню та про машини, що здатні розвивати цю силу» Цикл Карно складається з чотирьох стадій:

1. Робоча речовина розширюється (ізотермічний процес).
2. Робоча речовина розширюється (адіабатичний процес).
3. Робоча речовина стискається (ізотермічний процес).
4. Робоча речовина стискається (адіабатичний процес).



- 1-1' ізометричне розширення
- 1'-2 адіабатичне розширення
- 2- 2' ізометричне стискання
- 2'-1 адіабатичне стискання

Неможливість повного перетворення внутрішньої енергії газу в роботу теплових двигунів обумовлена необоротністю процесів у природі. Якби теплота могла мимовільно повертатися від холодильника до нагрівача, то внутрішня енергія могла б бути цілком перетворена в корисну роботу за допомогою будь-якого теплового двигуна.

Відповідно до закону збереження енергії робота, здійснювана двигуном, дорівнює:

$$A' = |Q_1| - |Q_2|$$

де  $Q_1$  — кількість теплоти, отримана від нагрівача, а  $Q_2$  -кількість теплоти, віддана холодильнику.

Коефіцієнтом корисної дії теплового двигуна називають відношення роботи  $A'$ , здійсненої двигуном, до кількості теплоти,

$$\eta = \frac{A'}{|Q_1|} = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}$$

отриманій від нагрівача:

ККД теплового двигуна менше одиниці. При  $T_1 - T_2 = 0$  двигун не може працювати.

Максимальне значення ККД теплових двигунів. Закони термодинаміки дозволяють обчислити максимально можливий ККД теплового двигуна, що працює з нагрівачем, що має температуру  $T_1$ , і холодильником з температурою  $T_2$ . Уперше це зробив французький інженер і вчений Сади Карно.

$$ККД = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100\%$$

$$ККД = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%$$

Карно придумав ідеальну теплову машину з ідеальним газом як робоче тіло. Він одержав для ККД цієї машини наступне значення:

Як і очікувалось, ККД машини Карно прямо пропорційний різниці абсолютних температур нагрівача і холодильника.

Головне значення цієї формули полягає в тому, як довів Карно, що будь-яка реальна теплова машина, що працює з нагрівачем, що має температуру  $T_1$ , і холодильником з температурою  $T_2$  не може мати ККД, що перевищує ККД ідеальної теплової машини.

При температурі холодильника, рівній абсолютному нулю,  $\eta=1$

## Лекція №6. Реальний газ - 1 год.

- План: 1.Рівняння Ван-дер-Ваальса.  
2.Критична температура.  
3.Ефект Джоуля-Томсона.  
4.Зрідження газів.  
5.Кріогенна техніка і її використання в с/г.

### Рівняння Ван-дер-Ваальса.

**Реальні гази.** На практиці досить часто доводиться мати справу із реальними газами – наприклад, стиснутими газами в повітряних гальмах, відбійних молотках, компресорах тощо. Досліджені нами властивості газів стосуються ідеального газу – газу, для якого власний об’єм молекул (атомів) і взаємодія між ними не впливають на досліджувані явища. Більшість реальних газів, як уже зазначалось при кімнатній температурі й нормальному атмосферному тиску за своїми властивостями близькі до ідеальних. Проте з підвищенням тиску реальні гази поводять себе по іншому порівняно з ідеальним, зокрема при стисканні, коли суттєво проявляють себе сили міжмолекулярної взаємодії. Щоб описати властивості реальних газів, потрібні інші рівняння, інша модель, ближча за властивостями до реального газу.

**Рівняння стану реального газу (рівняння Ван-дер-Ваальса).** Задовільною моделлю реального газу, є така, в якій молекули газу мають власний об’єм, їх можна вважати абсолютно пружними кульками між якими діють сили притягання, сили відштовхування проявляють себе у моменти зіткнень.

В реальних газах частинки газу мають розміри і взаємодіють між собою

$PV = \frac{m}{M} RT$  - рівняння Менделєєва

### Рівняння Ван –дер –Вальса

$$\left(P - \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = \frac{m}{M} RT$$

$a$  і  $b$  сталі Ван-дер-Вальса які враховують відповідні розміри молекули газу та ступінь взаємодії. Для кожного виду реального газу ці сталі і їх можна взяти для кожного виду газу і їх можна взяти постійні рівняння Ван-дер-Вальса.

Рівняння ван дер Ваальса описує збільшення тиску при зменшенні об’єму розріджених газів, перенасичену пару, перегріту рідину, різке зменшення стисливості в рідкій фазі. Рівняння ван дер Ваальса визначає також критичну температуру, вище якої газ не зріджується при жодному тиску. Фактично рівняння Ван дер Ваальса описує різницю між станом реального та ідеального газів. Поправки  $a$  і  $b$  мають більше значення при високих тисках газів. Наприклад, для азоту при тиску порядку 80 атм розрахунки проведені за рівняннями ідеального та реального газів різняться приблизно на 5%, а при тиску порядку 400 атм різниця складає вже 100%.

Рівняння ван дер Ваальса описує газ, молекули якого взаємодіють між собою. Молекули притягаються на великих відстанях і відштовхуються, підходячи близько одна до одної. Притягування зумовлене ван дер Ваальсовими силами, а відштовхування — принципом Паулі.

За своєю природою  $b$  — виключений об'єм, який виникає через неточковість розміру молекул. Параметр  $a$  описує притягування між молекулами на великій відстані.

### Критична температура.

Критична температура — така температура, при якій густина і тиск насиченої пари стають максимальними, а густина рідини, що перебуває у динамічній рівновазі з паром, стає мінімальною. При температурі, вищій за критичну температуру газу, його неможливо сконденсувати при жодному тиску.

Зазвичай критична температура позначається  $T_k$  або  $T_c$ .

На критичній ізотермі область, в якій тиск в газі при конденсації не змінюється зі зменшеннями об'єму (модуль всебічного стиску дорівнює нулю), зводиться до однієї точки. Ця точка називається критичною точкою.

Критичній точці відповідає крім критичної температури також критичний тиск  $P_k$  та критичний об'єм  $V_k$ , який, проте, залежать від маси газу. Зазвичай критичні ізотерми проводяться для моля газу.

Критична температура деяких речовин

Речовина	Критична температура (°C)
Азот	-146.9
Аргон	-122.29
Бром	315
Водень	-240.17
Гелій	-267.96
Йод	546
Кисень	-118.57
Криптон	-63.7
Ксенон	16.58
Арсен	1400
Неон	-228.75
Радон	105
Ртуть	1477
Селен	1493
Сірка	1041
Фосфор	721
Фтор	-128.85
Хлор	143.8

### Ефект Джоуля-Томсона.

Ефект Джоуля-Томсона — зміна температури газу під час його адіабатичного розширення (дроселювання). Має мінусовий та плюсовий ефекти.

Адіабатичний процес відбувається при відсутності теплообміну із середовищем. При адіабатичному розширенні газ виконує роботу, втрачаючи внутрішню енергію, що призводить до пониження температури.

Ефект Джоуля-Томпсона використовується для отримання наднизьких температур, зрідження газів, тощо.

### Зрідження газів.

Основною сировиною для одержання зріджених вуглеводних газів є тучні і природні нафтові гази:

а) попутний нафтовий газ на газобензинових заводах;

б) газ термічної і термокаталітичної переробки нафти і нафтопродуктів на установках термічного каталітичного крекінгу, піролізу і коксування, алкілювання й інших процесів;

в) штучні гази на заводах синтетичного моторного палива (заводи деструктивно-гідрогенізаційної переробки вугілля і важких нафтопродуктів, синтезу моторного палива, з оксиду вуглецю і водню й ін.);

г) природні гази, що містять крім метану, деяка кількість більш важких вуглеводнів. Тому що в природних газах вміст більш важких вуглеводнів (пропану і бутану) невеликий, то одержують з них рідкі гази дуже рідко;

д) газоконденсатні родовища промислового значення. Найбільшу цінність для одержання рідких вуглеводневих газів мають попутні нафтові гази. Нафта на виході сепараторів, у залежності від режиму сепарації, також містить значну кількість розчинених у ній важких вуглеводневих газів. Гази, які виділяються з нафти, після сепараторів, містять близько 30% пропану, 30-35% бутану і близько 30% газового бензину. Ці гази, тобто гази, отримані в результаті стабілізації нафти, є цінними для виробництва зріджених газів, що звичайно і вилучаються на газобензинових заводах.

Штучні, заводські нафтові гази, тобто гази, отримані при деструктивній, термічній і термокаталітичній переробці нафти, різко відрізняються за своїм складом від природних газів, як від попутних, так і від природних.

Це розходження полягає в тому, що штучні нафтові гази містять значну кількість ненасичених олефінових вуглеводнів, що є дуже цінною сировиною для безлічі всіляких реакцій органічного синтезу.

Отже, основними джерелами для одержання паливних рідких вуглеводневих газів (пропан, бутан) повинні служити попутні гази, гази газоконденсатних родовищ, штучні нафтові гази і гази деструктивної гідрогенізації твердого і рідкого палива. Однак варто вказати, що гази термічної і термокаталітичної переробки нафти і нафтопродуктів, які містять значну кількість реакційно-здатних неграничних вуглеводнів, насамперед, повинні піддаватися відповідній переробці для їхнього фракціонування з наступним використанням у різних синтезах. У зв'язку з викладеним, процеси одержання рідких вуглеводневих газів будуть нижче розглянуті стосовно до попутних і інших аналогічних газів.

### **Кріогенна техніка і її використання в с/г.**

Кріогенна техніка, техніка здобуття і використання кріогенних температур, тобто температур нижче 120 До.

Основні проблеми, що вирішуються До. т.: зріджування газів (азоту, кисню, гелію і ін.), їх зберігання і транспорт в рідкому стані; розділення газових сумішей і ізотопів низькотемпературними методами (наприклад, промислове здобуття чистих азоту кисню і аргону з повітря: виділення дейтерію ректифікацією рідкого водню і т. д.); конструювання кріорефрижераторов — холодильних машин, що створюють і підтримують температуру нижче 120 До;

охолодження і термостатування при криогенних температурах надпровідних і електротехнічних пристроїв (магнітів, соленоїдів, трансформаторів, електричних машин і кабелів, вузлів ЕОМ(електронна обчислювальна машина), гіроскопів і т. п.), електронних приладів (квантових підсилювачів і генераторів, приймачів інфрачервоного випромінювання і т. д.), біологічних об'єктів; розробка апаратури і устаткування для проведення наукових досліджень при криогенних температурах (кріостатів, бульбашкових камер і ін.).

### **Лекція №7. В'язкість рідини. Закон Стокса Поверхневі явища. Сила поверхневого натягу – 1 год.**

*План:*

1. Ідеальна рідина
2. Механізм виникнення сил внутрішнього тертя.
3. Закон Ньютона для сили в'язкості.
4. Фізичний зміст коефіцієнта в'язкості.
5. Умова для рівномірного руху кульки в рідині Закон Стокса
6. Поверхневі явища.
7. Внутрішній тиск.
8. Фізичний зміст коефіцієнта поверхневого натягу.

**Ідеальна рідина** це рідина без тертя. Всім реальним рідинам і газам в більшій чи меншій мірі властива в'язкість або внутрішнє тертя. В'язкість проявляється в тому, що після припинення причин виникнення руху в рідині або газі, що його викликали, поступово припиняється.

Рух рідини, при якому шари рідини ковзають один відносно одного без виникнення завихрень називається **ламіна́рним**. Властивість рідини створювати опір переміщенню одного, шару відносно другого називається **в'язкістю**, або **внутрішнім тертям**.

**Механізм виникнення сил внутрішнього тертя:** в'язкість виникає тому, що на границі розподілу двох шарів рідини, що рухаються в одному напрямку, але з різними швидкостями, діє сила, яка намагається зрівняти швидкість обох шарів. Ця сила, обумовлена переносом кількості руху з одного шару в інший, завдяки тепловому руху молекул, і називається силою в'язкості.

Згідно закону Ньютона сила в'язкості (внутрішнього тертя), що зумовлює рух шарів рідини один відносно другого, пропорційна коефіцієнтові в'язкості, площі шарів, по якому відбувається рух, та градієнту швидкості течії.

Формула **Ньютона для сили в'язкості** (внутрішнього тертя) у випадку одномірного руху ( $V = V(x)$ ) дорівнює

$$F = \pm \eta S \frac{dv}{dx}, \quad (1)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт в'язкості, або динамічна в'язкість,

$S$  – площа взаємодії шарів рідини, що рухаються,

$\frac{dv}{dx}$  – градієнт швидкості руху молекул вздовж вісі  $Ox$ , який перпендикулярний

границі розподілу шарів рідини.

Відношення  $\frac{dv}{dx} = \frac{\Delta V}{\Delta x}$  показує зміну швидкості при переході від шару до шару в напрямі  $x$ , перпендикулярному до напрямку руху шарів, називається градієнтом швидкості.

$$\Delta V = V_2 - V_1,$$

де  $V_2, V_1$  – швидкості шарів,  $\Delta x$  – відстань між шарами,

знак  $\pm$  у формулі (1) відповідає гальмуючій і прискорюючій силам.

*Коефіцієнт пропорційності, який залежить від природи і стану рідини називається коефіцієнтом в'язкості або внутрішнього тертя.*

*В'язкість виражається в паскаль-секундах (Па·с): один паскаль-секунда дорівнює коефіцієнту динамічної в'язкості середовища, в якому при ламінарній течії і градієнті швидкості з модулем, що дорівнює 1м/с на 1м, виникає сила внутрішнього тертя в один ньютон на 1м<sup>2</sup> поверхні дотику шарів. (Па·с=1Н·с/м<sup>2</sup>).*

*Фізичний зміст коефіцієнта в'язкості  $\eta$ : коефіцієнт в'язкості чисельно дорівнює силі внутрішнього тертя, що виникає на межі двох шарів одиничної площі при градієнті швидкості рівному одиниці.*

Коефіцієнт в'язкості залежить від роду рідини і від температури. З підвищенням температури рідини він зменшується, так як при цьому збільшується середня відстань між молекулами, і відповідно зменшується зв'язок між ними.

При русі тіла у в'язкому середовищі з малими швидкостями на нього діє сила в'язкості тому, що тіло яке рухається в рідині захоплює прилеглі до нього шари і тому зазнає опір з боку рідини

$$F = -\mu V, \quad (2)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт опору середовища, зв'язаний з коефіцієнтом в'язкості.

$V$  – швидкість відносного руху.

При малих швидкостях руху тіла, рух рідини відносно нього можна рахувати ламінарним і коефіцієнт опору в цьому випадку залежить від розмірів тіла та коефіцієнта в'язкості закон Стокса.

Коли кулька рухається в рідині на неї діють три сили: це сила тяжіння  $F_T$ , сила тертя  $F_{тр}$  і архімедова сила  $F_A$  (виштовхувальна) рис.1.

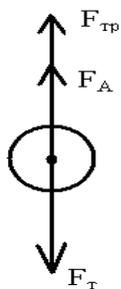


Рис.1

Згідно другого закону Ньютона векторна сума всіх прикладених до тіла сил чисельно дорівнює добутку маси тіла на його прискорення:

$$\overline{ma} = \overline{F}_T + \overline{F}_{тр} + \overline{F}_A, \quad \text{при рівномірному русі } a=0,$$

$$\text{відповідно } 0 = \overline{F}_T + \overline{F}_{тр} + \overline{F}_A. \quad \text{Спроектуємо вектори}$$

сили на вісь ОУ:  $0 = -F_T + F_{TP} + F_A$ . **Отже умова для рівномірного руху кульки в рідині:**

$$F_T = F_{TP} + F_A$$

**Закон Стокса:** для тіл шароподібної форми, які рухаються з невеликими швидкостями, сила опору рідини  $F$  пропорційна швидкості, радіусу кулі і коефіцієнту в'язкості.

$$F = 6\pi\eta Vr$$

**Поверхневі явища** спостерігаються на межі розподілу двох фаз, наприклад, рідини і її насиченої пари, рідини, і твердого тіла, двох рідин, що не змішуються. Поверхневі явища відіграють важливу роль в таких процесах, як збагачення руд з допомогою флотації, поглинання шкідливих газів і пари, отримання стійких емульсій та ін.

Поверхня межі різко відрізняється своїми фізико-хімічними властивостями від обох граничних фаз.

Розглянемо поверхню межі газ - рідина. Молекули в рідинах розташовані на відстані, що відповідають мінімальному значенню енергії взаємодії. На таких відстанях молекули інтенсивно взаємодіють. Сили взаємодії залежать від природи молекул і значно відрізняються по величині для різних рідин. Тепловий рух молекул рідини суттєво відрізняється від теплового руху молекул газу. Середні відстані між молекулами близькі до рівноважних. Це означає, що молекули коливаються біля положення рівноваги, але в зв'язку з хаотичністю теплового руху, амплітуда коливань сусідніх молекул різна і час від часу настільки, що деякі молекули перескакують в нове положення рівноваги і починають здійснювати коливання навколо нового положення рівноваги. Таким чином молекула мандрує по всьому об'єму рідини.

На молекулу, що знаходиться всередині рідини (рис., положення I), діють сили взаємного тяжіння з боку всіх оточуючих її молекул.

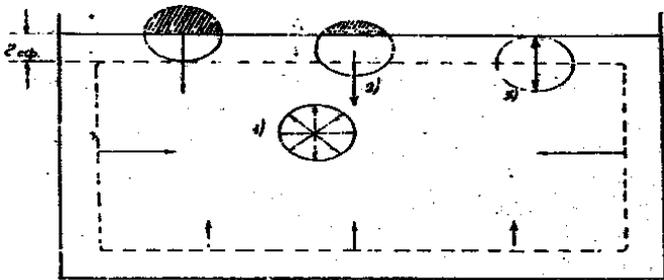


Рис.

Рівнодіюча цих сил в положенні I дорівнює нулю і для переміщення молекули всередині рідини не потрібно виконувати роботу. Сили міжмолекулярного зв'язку діють тільки на дуже близьких відстанях, тому на молекулу діє сила тільки з боку її найближчих сусідів.

Для молекул, розташованих по поверхні (рис. положення II, III) не всі сили молекулярного притягнення будуть скомпенсовані. Це пояснюється тим, що в газовій фазі (пар над рідиною) молекули розташовані одна від одної на великих відстанях, діючі між ними сили міжмолекулярної взаємодії надзвичайно малі і на молекули на поверхні діють сили тільки з боку молекул рідини. Отже, всі молекули, що знаходяться на відстані від поверхні, що розділяє фази, менше радіуса дії молекулярних сил, відчувають притягнення з боку молекул своєї фази. Для них рівнодіюча молекулярних сил не дорівнює нулю і направлена всередину рідини.

Результуюча всіх сил молекулярного притягання діючих на одиницю поверхні, називається молекулярним або внутрішнім тиском.

Це саме той тиск, який потрібно було б додати ззовні, для того щоб зберегти об'єм рідини незмінним, якщо б зникло взаємне притягнення молекул. Внутрішній тиск у воді – 15000 атм., у бінзола – 4000 атм.

Під дією не скомпенсованих молекулярних сил молекули з поверхневого шару намагаються перейти до середини рідкої фази. Перехід молекул з поверхні в об'єм означає скорочення вільної поверхні рідини. Таким чином, рідина під дією внутрішніх сил намагається зменшити вільну поверхню, якщо цьому не заважають інші сили. Так, наприклад, невеликі краплі туману мають форму сфери, тому що сфера має найменшу поверхню при заданому об'ємі.

Для того, щоб збільшити вільну поверхню рідини, потрібно виконати роботу тим більшу, чим більше приріст поверхні. Тобто

$$\Delta A = \sigma \cdot \Delta S, \quad (1)$$

де  $\sigma$  – коефіцієнт пропорційності, що називається коефіцієнтом поверхневого натягу, чи просто поверхневим натягом.

Очевидно, що

$$\sigma = \frac{\Delta A}{\Delta S} \quad (2)$$

**Фізичний зміст коефіцієнта поверхневого натягу.** При  $\Delta S = 1$ ,  $\sigma \approx \Delta A$  коефіцієнт поверхневого натягу чисельно дорівнює роботі, яку потрібно виконати для збільшення поверхні рідини на одиницю. В системі СІ поверхневий натяг вимірюється в Дж/м<sup>2</sup> чи Н/м.

Коли під дією сил молекулярного притягання молекули переходять у середину рідини, поверхня скорочується. При цьому мікроскопічна картина сил, що діють на кожен окрему молекулу, буде досить складною. Результуюча дій сил, що направлені до середини рідини, еквівалентна дії деякої сили, перпендикулярної до контура, що обмежує поверхню рідини і направлена по дотичній до поверхні рідини **називається силою поверхневого натягу**. Якщо при скороченні поверхні ребро контура зміщується на величину  $dx$ , то при цьому силою поверхневого натягу здійснюється робота

$$dA = F \cdot dx \quad (3)$$

Сили молекулярного притягання здійснюють за той час роботу

$$dA = \sigma \cdot dS, \quad (4)$$

де  $dS$  – зміна поверхні, яку можна представити як добуток  $l \cdot dx$ ,

де  $l$  – довжина контура, що обмежує поверхню. Порівнявши ці вирази отримаємо  $\sigma \cdot dx = F \cdot dx$

Звідси

$$\sigma = \frac{F}{l} \quad (5)$$

при  $l = 1$ ,  $\sigma = F$ . Отже, можливо дати і друге визначення коефіцієнта поверхневого натягу: *коефіцієнт поверхневого натягу чисельно дорівнює силі*

поверхневого натягу, що діє на одиницю довжини контура, яка обмежує поверхню.

Величина поверхневого натягу  $\sigma$  залежить від природи рідини та умов в яких вона знаходиться, зокрема від температури. Тому, щоб визначити  $\sigma$ , необхідно зафіксувати температуру при якій були зроблені вимірювання.

Напружений стан поверхневого шару рідини називається *поверхневим натягом*; цей стан визвано силами щеплення між молекулами цього шару.

Під *силою поверхневого натягу*  $F$  розуміють суму сил притягання, що діють на контур, який обмежує поверхню рідини.

$$F = \sigma \cdot l$$

## Модуль 4. Електричний струм.

### Лекція №8. Електростатика - 2 год.

План: 1.Електричне поле.

2.Напруженість поля. Теорема Остроградського.

3.Потенціал. Напруга.

4.Напруга в електричному полі.

5.Електрична індукція. Електростатичний захист.

6.Електроємність. Конденсатори та їх з'єднання.

7.Енергія електричного поля.

8.Поляризація діелектриків. Діелектрична проникність.

#### Електричне поле

Електричне поле — це складова частина електромагнітного поля, яка описує взаємодію між нерухомими зарядами.

Кількісними характеристиками електричного поля є вектор напруженості електричного поля  $\mathbf{E}$  й вектор електричної індукції  $\mathbf{D}$ .

У випадку, коли електричне поле змінюється з часом, його називають електростатичним полем.

Розділ фізики, який вивчає розподіл статичного електричного поля в просторі, називається електростатикою.

Електричне поле створюється зарядженими тілами, зокрема зарядженими елементарними частинками. Таке поле є потенціальним. Його напруженість визначається законом Кулона. Силкові лінії потенціального електричного поля починаються і закінчуються на зарядах або виходять на нескінченність.

За законом електромагнітної індукції електричне поле створюється також змінним магнітним полем. Таке електричне поле - вихрове. Силкові лінії вихрового електричного поля замкнені.

#### Напруженість поля.

Напруженість електричного поля — це векторна фізична величина, яка дорівнює силі, яка діє у данній точці простору у данний момент часу на пробний одиничний електричний заряд у електричному полі.

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E}$$

де  $\mathbf{F}$  — сила,  $q$  — заряд,  $\mathbf{E}$  — напруженість електричного поля.

В системі СІ вимірюється у В/м, на практиці здебільшого у В/см.

## Теорема Остроградського.

Визначимо потік напруженості поля електричних зарядів  $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$  крізь деяку замкнуту поверхню, яка оточує ці заряди (Рис 1). Будемо вважати потік від'ємним, якщо він направлений всередину поверхні; в іншому випадку будемо вважати його додатнім.

Розглянемо спочатку випадок сферичної поверхні радіусом  $R$ , що оточує один заряд  $q$ , що знаходиться в центрі (Рис 2). Напруженість поля на всій сфері однакова і рівна.

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2}$$

Силкові лінії направлені по радіусах, тобто перпендикулярно до поверхні сфери, тоді потік напруженості  $N$  розрахуємо за формулою:

$$N = ES = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2} 4\pi R^2 = \frac{q}{\epsilon_0}$$

де  $S=4\pi R^2$  – площа сферичної поверхні.

Оточимо тепер сферу довільною замкнутою поверхнею. Як видно на рис. 2, кожна силова лінія, що пронизує цю сферу, пронизить і цю поверхню. Відповідно, формула (1) справедлива не тільки для сфери, а й для будь-якої замкнутої поверхні.

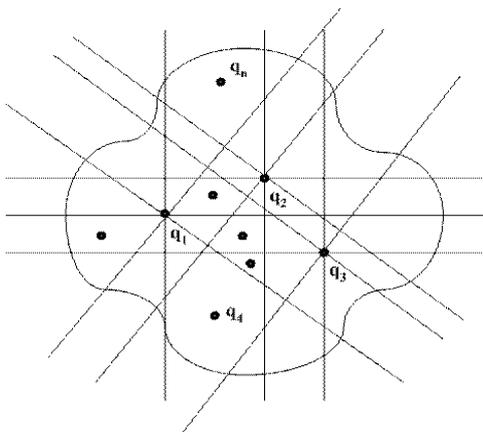


Рис 1

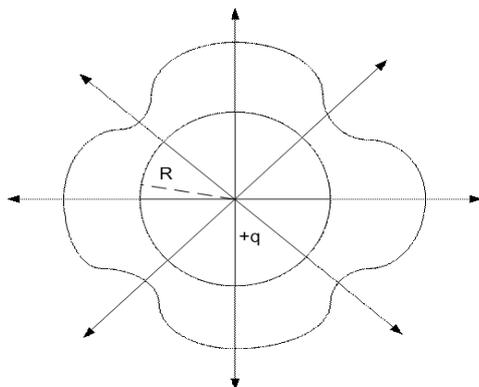


Рис. 2

Тепер повернемося до загального випадку довільної поверхні, яка оточує  $n$  зарядів (Рис 1). Очевидно, що потік напруженості через поверхню рівний сумі потоків, створюваних кожним.

$$N = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{\epsilon_0}$$

із зарядів: або остаточно

$$N = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i$$

Отже, потік напруженості, пронизуючий будь-яку замкнену поверхню, яка оточує електричні заряди, пропорційний алгебраїчній сумі оточених зарядів.

Це положення називається теоремою Остроградського – Гаусса.

### Потенціал.

Потенціал — скалярна характеристика фізичного поля.

Енергетична характеристика даної точки будь-якого силового поля. Чисельно дорівнює роботі, яку здійснюють сили поля, переміщуючи одиницю маси (потенціал тяжіння) чи електричного заряду (електростатичний потенціал) з даної точки поля в точку, де потенціал вважають рівним нулю.

Потенціал — універсальна функція координат простору (яка не залежить від часу), що характеризує роботу, необхідну для переміщення пробного об'єкта із

деякої фіксованої точки простору в дану точку. В якості фіксованої точки простору загалом приймають точку, яка знаходиться на безмежності. Отже, потенціал — це величина, що чисельно (але не за розмірністю) дорівнює роботі, витраченої на переміщення пробного об'єкта з безмежності в дану точку простору.

Потенціал існує не для всіх полів, а лише для полів такої конфігурації, де робота з переміщення об'єкта не залежить від шляху, яким відбувається переміщення, а залежить лише від координат початкової та кінцевої точки переміщення.

### **Напруга.**

Напру́га — напругою  $U_{12}$  на ділянці електричного кола 1-2 називається фізична величина, що визначається роботою, яка виконується сумарним полем електростатичних і сторонніх сил при переміщенні одиничного позитивного заряду на даній ділянці кола. Поняття напруги є узагальненим поняттям різниці потенціалів: напруга на кінцях ділянки кола дорівнює різниці потенціалів в тому випадку, якщо на цій ділянці не прикладена електрорушійна сила.

Напруга вимірюється у вольтах.

Для вимірювання напруги використовуються прилади, які називаються вольтметрами, мілівольтметрами тощо.

В побутовій електромережі України використовується змінний струм із напругою 220 В.

### **Напруга в електричному полі.**

Електрична напруга ( $U$ ) між двома точками електричного ланцюга або електричного поля, дорівнює роботі електричного поля по переміщенню одиничного позитивного заряду з однієї крапки в іншу. У потенційному електричному полі ця робота не залежить від дороги, по якій переміщується заряд; в цьому випадку  $E_n$  між двома крапками збігається з різницею потенціалів між ними.

Якщо поле непотенційне, то напруга залежить від тієї дороги, по якій переміщується заряд між крапками. Непотенційні сили, називаються сторонніми, діють усередині будь-якого джерела постійного струму (генератора, акумулятора, гальванічного елемента і ін.). Під напругою на затисках джерела струму завжди розуміють роботу електричного поля по переміщенню одиничного позитивного заряду уздовж дороги, лежачого зовні джерела; в цьому випадку  $E_n$  дорівнює різниці потенціалів на затисках джерела і визначається Ома законом:  $U = IR - E$ , де  $I$  — сила струму,  $R$  — внутрішній опір джерела, а  $E$  — його електрорушійна сила (едс). При розімкненому ланцюзі ( $I = 0$ ) напруга по модулю рівна едс(електрорушійна сила) джерела. Тому едс(електрорушійна сила) джерела часто визначають як  $E_n$  на його затисках при розімкненому ланцюзі.

В разі змінного струму  $E_n$  зазвичай характеризується значенням, що діє (ефективним), яке є середньоквадратичним за період значенням напруги. Напруга на затисках джерела змінного струму або котушки індуктивності вимірюється роботою електричного поля по переміщенню одиничного позитивного заряду уздовж дороги, лежачого зовні джерела або котушки. Вихрове (непотенційне) електричне поле на цій дорозі практично відсутнє, і напруга дорівнює різниці потенціалів.  $E_n$  зазвичай вимірюють вольтметром. Одиниця  $E_n$  у Міжнародній системі одиниць — вольт.

## Електрична індукція.

Електрична індукція поширюється подібно хвилям з кінцевою швидкістю; світлові явища не відрізняються від електричної індукції; для аналізу зазначених явищ варто використовувати теорію коливань. Фарадей відкрив, користуючись сучасною термінологією, явище електромагнітної індукції й інтуїтивно пророчив існування електромагнітних хвиль.

Слово «індукція» походить від латинського кореня, який означає наведення.

На заряд у суцільному середовищі з боку інших зарядів діють сили відмінні від сил у вакуумі. Причиною цього є поляризація середовища. Будь-який матеріал складається із електронів і йонів, які під дією зовнішнього поля зміщуються. В результаті ці наведені заряди створюють свої поля, згідно з принципом Лешательє-Брауна, реакція будь-якої системи на зовнішній вплив намагається зменшити ефект цього впливу. Електричне поле, яке діє на пробний заряд з боку інших зовнішніх зарядів менше, ніж у випадку відсутності середовища.

Напруженість електричного поля, розрахована без врахування наведених зарядів і поляризації, й називається вектором електричної індукції у системі СГС. В системі СІ вектор електричної індукції визначений із іншою розмірністю, ніж розмірність напруженості електричного поля, а тому результат розрахунку потрібно ще домножити на  $\epsilon_0$  — діелектричну проникність вакууму.

Вектор електричної індукції — кількісна характеристика електричного поля у суцільному середовищі.

$$\mathbf{D} = \mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P}$$

де  $\mathbf{P}$  — вектор поляризації

Здебільшого позначається латинською літерою  $\mathbf{D}$ .

## Електроємність.

Електроємністю (ємністю) — провідника  $C$  називають величину, що дорівнює відношенню заряду  $q$ , наданого провіднику до його потенціалу :

$$C = \frac{q}{\varphi}$$

Одиниця електричної ємності в СІ — фарад,  $[C] = \text{Кл/В} = \Phi$ .

## Конденсатори та їх з'єднання.

Система з двох провідників розділених шаром діелектрика, товщина якого мала порівняно з розмірами провідників, називається конденсатором. Конденсатор бувають плоскі, циліндричні, сферичні.

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$$

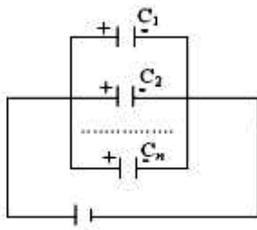
Електроємність плоского конденсатора:

$S$  — площа пластини,  $d$  — відстань між пластинами,  $\epsilon$  — діелектрична проникність діелектрика.

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

Ємність конденсатора з  $n$  пластин:

Конденсатори з'єднують у батареї паралельно або послідовно.



Паралельне з'єднання

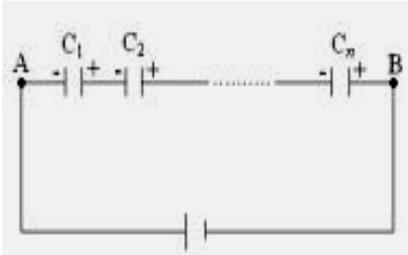
Напруги на всіх конденсаторах однакові:

$$U_1 = U_2 = \dots = U_n$$

$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_n$$

$$\text{Тоді } C_{\text{пар}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

Послідовне з'єднання



Заряди усіх конденсаторів при послідовному їх з'єднанні однакові.

$$U = \frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \dots + \frac{q}{C_n}$$

$$\frac{1}{C_{\text{всг}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Загальна ємність:

### Енергія електричного поля.

Електрична енергія — термін, під яким мається на увазі енергія, наявна в електромагнітному полі. Сюди ж відносяться окремі випадки чистого електричного поля і чистого магнітного поля. Ця енергія рівна механічній роботі, здійснюваній при переміщенні зарядів та провідників у електричному і магнітному полях.

Для електричного і магнітного полів їх енергія пропорційна квадрату напруженості поля. Слід зазначити, що, строго кажучи, термін енергія електромагнітного поля є не цілком коректним. Обчислення повної енергії електричного поля навіть одного електрона приводить до значення рівного нескінченності, оскільки відповідний інтеграл (див. нижче) розходиться. Нескінченна енергія поля цілком скінченного електрона складає одну з теоретичних проблем класичної електродинаміки. Замість нього у фізиці зазвичай використовують поняття густини енергії електромагнітного поля (у певній точці простору). Загальна енергія поля дорівнює інтегралу густини енергії по всьому простору.

Густина енергії електромагнітного поля є сумою густин енергій електричного і магнітного полів.

$$u = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu_0 H^2}{2}$$

У системі СІ для вакууму:

де  $E$  — напруженість електричного поля,  $H$  — напруженість магнітного поля,  $\epsilon_0$  — електрична стала, і  $\mu_0$  — магнітна стала.

### Поляризація діелектриків.

Поляризація діелектриків — виникнення диполь електричного моменту діелектрика, поміщеного у зовнішнє електричне поле; явище зміщення електричних зарядів діелектрика під впливом зовнішнього електричного поля

зумовлює виникнення внутрішнього електричного поля з протилежним напрямком, наслідком чого є зменшення прикладеного поля.

Поляризація діелектрика - стан діелектрика, який характеризується наявністю електричного моменту у будь-якого елемента його обсягу.

Розрізняють поляризацію, що виникає під дією зовнішнього електричного поля, і спонтанно (мимовільно) поляризацію, існуючу за відсутності поля. У деяких випадках поляризація діелектрика з'являється під дією механічних напруг, сил тертя або внаслідок зміни температури.

Поляризація не змінює сумарного заряду в будь-якому макроскопічному обсязі всередині діелектрика. Однак вона супроводжується появою на поверхні діелектрика пов'язаних електричних зарядів з поверхневою щільністю  $\sigma$ . Ці пов'язані заряди створюють у діелектрику додаткове макроскопічне поле з напруженістю  $E_1$ , спрямоване проти зовнішнього поля з напруженістю  $E_0$ . Результуюча напруженість поля  $E$  всередині діелектрика  $E = E_0 - E_1$ .

#### **Діелектрична проникність.**

Діелектрична проникність (діелектрична стала) середовища  $\epsilon$  — безрозмірна величина, що характеризує ізоляційні властивості середовища. Вона показує, в скільки разів взаємодія між зарядами в однорідному середовищі менша ніж у вакуумі.

Відносна діелектрична проникність речовини  $\epsilon_r$  може бути визначена шляхом порівняння електричної ємності тестового електричного конденсатора з певним діелектриком ( $C_x$ ) і ємності того ж конденсатора у вакуумі ( $C_0$ ):

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0}.$$

Зменшення сили взаємодії між зарядами викликане процесами поляризації середовища. У електричному полі електрони в атомах та молекулах зміщуються відносно йонів, і виникає наведений дипольний момент. Ті молекули, які мають власний дипольний момент (наприклад, молекула води), орієнтуються в електричному полі. Дипольні моменти створюють своє електричне поле, яке протидіє тому полю, що зумовило їх появу. В результаті сумарне електричне поле зменшується. При невеликих полях таке зменшення можна описати за допомогою діелектричної проникності.

Необхідно зазначити, що великі електричні поля можуть сильно змінити процеси, які відбуваються в середовищі. Наприклад, може наступити пробій. В такому випадку поняття діелектричної проникності втрачає сенс.

## **Лекція №9. Електричний струм Термоелектричні та термоелектронні явища - 2 год.**

*План:* 1.Струм. Сила струму.

2. Закон Ома. Опір провідників та залежність його від температур.

3.Надпровідність. Робота та потужність постійного струму.

4.Правила Кіргофа.

5.Контактна різниця потенціалів.

6.Робота виходу. Термопара. Термоелектронна емісія.

## 7. Електронні прилади

### Струм

Електричний струм — впорядкований рух заряджених частинок у просторі. У металах це електрони, напівпровідниках - електрони та дірки, у електролітах - позитивно та негативно заряджені іони, у іонізованих газах — іони та електрони. За напрямком струму вибирають рух позитивно заряджених частинок. Таким чином, напрямком струму в металах протилежний напрямку руху електронів.

Кількісно електричний струм характеризується диференційною векторною величиною густиною струму, або у випадку струму в проводах інтегральною величиною силою струму.

### Сила струму.

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

Величина  $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$  називається силою струму, і відповідає кількості заряду ( $\Delta q$ ), переміщеному через перетин провідника за час  $\Delta t$ .

У системі СІ сила струму вимірюється в амперах. Відповідно, густина струму вимірюється в А/м<sup>2</sup>.

Якщо за кожен проміжок часу  $\Delta t$  заряд  $\Delta q$  однаковий і напрямком струму незмінний, то такий струм називають постійним.

У випадку, коли ці величини змінні, силу струму описують так:

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} = q'$$

такий струм називають змінним.

Для класичної системи заряджених частинок із зарядом  $e$  безмежно малий заряд  $dQ$ , що переноситься за час  $dt$  через елементарну площадку  $dS$ , перпендикулярну напрямку середньої швидкості  $v$  частинок визначається так:

$$dQ = envdSdt$$

де  $e$  — заряд частинок,  $v$  — швидкість руху частинок, а  $n$  — їх кількість в одиниці об'єму.

Сила струму  $dI$  через площадку  $dS$  визначається співвідношенням  $dI = envdS$  згідно з яким  $\mathbf{j} = en\bar{v}$  — густина електричного струму, де риска над символами означає усереднення.

### Закон Ома.

Закон Ома — це твердження про пропорційність сили струму в провіднику прикладеній напрузі.

Закон Ома справедливий для металів і напівпровідників при не надто великих прикладених напругах. Якщо для елемента електричного кола справедливий закон Ома, то говорять, що цей елемент має лінійну вольт-амперну характеристику.

У електротехніці прийнято записувати закон Ома у інтегральному вигляді

$$U = I \cdot R$$

де  $U$  — прикладена напруга,  $I$  — сила струму,  $R$  — опір провідника.

Проте опір є характеристикою провідника, а не матеріалу, й залежить від довжини та поперечного перерізу провідника. Тому в фізиці застосовують закон Ома у диференціальному вигляді:  $\mathbf{j} = \sigma \cdot \mathbf{E}$  де  $j$  — густина струму,  $\sigma$  — питома провідність матеріалу,  $E$  — напруженість електричного поля.

Питома провідність залежить від кількості вільних носіїв заряду в провіднику і від їхньої рухливості.

Різниця потенціалів (напруга) на кінцях провідника довжиною  $l$  з постійною напруженістю електричного поля  $E$  дорівнює  $U = \Delta\varphi = El$

Якщо провідник має площу перерізу  $S$ , то сила струму в ньому зв'язана з густиною сили струму формулою:

$$I = jS.$$

Виходячи із закону Ома в формі

$$j = \sigma E$$

і, підставляючи значення  $j = I / S$  та  $E = U / l$ , отримуємо рівняння

$$\frac{I}{S} = \sigma \frac{U}{l} \quad \text{або} \quad U = \frac{l}{\sigma S} I = RI \quad \text{де опір } R \text{ визначається через питому}$$

провідність формулою  $R = \frac{l}{\sigma S} = \rho \frac{l}{S}$ .

Тут  $\rho = 1 / \sigma$  - питомий опір.

В повному колі окрім опору навантаження є ще джерело джерело живлення, яке має свій власний внутрішній опір. Сила струму в ньому визначається формулою

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

де  $\mathcal{E}$  - електрорушійна сила,  $R$  - опір навантаження,  $r$  - внутрішній опір джерела струму.

### Опір провідників та залежність його від температур.

Питомий опір — кількісна характеристика речовини, якою визначається здатність створювати опір електричному струму.

Позначається зазвичай грецькою літерою  $\rho$ .

Одиниця вимірювання питомого опору в системі СІ — Омм.

Питомий опір використовується для характеристики провідників і напівпровідників в умовах, коли виконується закон Ома.

Питомий опір — обернена величина до питомої провідності  $\sigma$ .

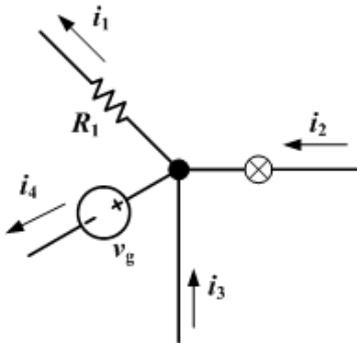
$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

Опір провідника довжиною  $l$  і з поперечним перерізом  $S$  визначається співвідношенням  $R = \rho \frac{l}{S}$ .

Питомий опір провідників зростає зі збільшенням температури. Це явище зумовлене посиленням хаотичного руху атомів, а отже збільшенням частоти розсіяння носіїв заряду. Для напівпровідників питомий опір здебільшого зменшується при підвищенні температури, з-за росту концентрації носіїв заряду.

Матеріал	Питомий опір (Омм)
мідь	$1,7 \times 10^{-8}$
золото	$2,44 \times 10^{-8}$
алюміній	$2,82 \times 10^{-8}$

залізо	$10 \times 10^{-8}$
платина	$11 \times 10^{-8}$
олово	$22 \times 10^{-8}$
графіт	$3,5 \times 10^{-5}$
германій	0,46
кремній	640
скло	1010



### Надпровідність.

Надпровідність — квантове явище протікання електричного струму у твердому тілі без втрат.

Явище надпровідності існує для низки матеріалів, не обов'язково добрих провідників при звичайних температурах. Перехід до надпровідного стану відбувається при певній температурі, яку називають критичною температурою надпровідного переходу.

Надпровідність, проте, може бути зруйнована, якщо помістити зразок у зовнішнє магнітне поле, яке перевищує певне критичне значення. Це критичне магнітне поле зменшується при збільшенні температури.

Надпровідність характеризується абсолютним діамagnetизмом. У магнітному полі в надпровідному матеріалі виникають такі струми, магнітне поле яких повністю компенсує зовнішнє магнітне поле, тобто магнітне поле виштовхується із надпровідника. Завдяки цій властості виникає явище левітації надпровідника над магнітом (або магніта над поверхнею надпровідника), яке отримало назву труна Магомета. Сильне магнітне поле руйнує надпровідність. Проте надпровідники розрізняються за своєю поведінкою у відносно сильних магнітних полях, у залежності від поверхневої енергії границі розділу надпровідної й нормальної фаз. У надпровідників I роду ця поверхнева енергія додатня, й надпровідність руйнується, якщо поле перевищує певний рівень, який називається критичним магнітним полем. У надпровідників II роду поверхнева енергія границі розділу нормальної та надпровідної фаз від'ємна, тож магнітне поле, коли його напруженість перевищує певне значення (воно називається першим критичним полем), починає проникати в надпровідник поступово в певних місцях, навколо яких утворюються вихрові струми (див. Абрикосівський вихор). Якщо збільшувати магнітне поле далі, то нормальних областей стає дедалі більше, й при критичному полі надпровідність руйнується повністю. Надпровідники другого роду використовуються для створення надпровідних електромагнітів.

### Робота та потужність постійного струму.

Постійний струм — електричний струм, незмінний в часі.

### Правила Кіргофа.

равила Кірхгофа визначають метод розрахунку складних розгалужених електричних кіл. Методика розрахунку розроблена Густавом Кірхгофом.

### Перше правило Кірхгофа:

В кожному вузлі алгебраїчна сума струмів дорівнює нулю.

При цьому струми, які входять в розгалуження й виходять із нього вважаються величинами різних знаків.

Математично перше правило Кірхгофа можна записати таким чином:  
$$\sum_i I_i = 0.$$

Перше правило Кірхгофа є наслідком закону збереження заряду. Для неперервно розподілених струмів у просторі воно відповідає рівнянню неперервності.

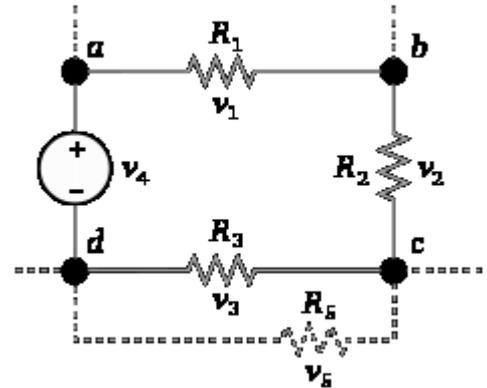
### Друге правило Кірхгофа:

Для будь-якого замкнутого контура проводів сума електрорушійних сил дорівнює сумі добутків сил струму на кожній ділянці контура на опір ділянки, враховуючи внутрішній опір джерел струму.

Математично друге правило Кірхгофа

$$\sum_i \mathcal{E}_i = \sum_k I_k R_k.$$

записується так:



Послідовне застосування правил Кірхгофа до усіх вузлів й контурів у складній електротехнічній мережі дозволяє скласти повну систему лінійних рівнянь для визначення сил струму на кожній із ділянок.

Для розрахунку перш за все малюють електротехнічну схему й довільним чином позначають стрілками напрями струмів на кожній ділянці. Потім виділяються замкнуті контури й обходяться в одному довільно вибраному напрямку. Якщо стрілка, яка вказує напрям струму направлена проти обходу, то відповідний добуток струму на опір береться зі знаком мінус.

Якщо при обході переходять від від'ємного полюса джерела струму до додатного, то е.р.с. записується з додатним знаком, якщо навпаки, то з від'ємним.

В результаті отримують систему рівнянь, розв'язуючи яку визначають сили струму. Якщо сила струму вийшла від'ємною, то це значить, що напрям струму на даній ділянці вгадали неправильно, хоча це не впливає на правильність результату.

### Контактна різниця потенціалів.

Контактна різниця потенціалів — різниця електростатичних потенціалів, яка виникає при контакті двох різних металів.

При контакті двох металів частина електронів перетікає з одного з них до іншого, доки не вирівнюються хімічні потенціали для електронів. У результаті цього процесу метали отримують заряд, який зосереджується в тонкому (мікроскопічному) шарі вздовж границі. Заряд на поверхні одного з металів додатній, іншого — від'ємний. Електричне поле, яке виникає при цьому, обмежене тонким подвійним шаром. Зазвичай цей шар настільки тонкий, що пропускає електричний струм — електрони тунелюють через нього.

Величина різниці потенціалів, яка виникає внаслідок утворення подвійного шару, визначається із умови вирівнювання хімічного потенціалу електронів:

$$\mu_1 + e\varphi_1 = \mu_2 + e\varphi_2$$

де  $e$  — заряд електрона,  $\mu_i$  — рівень Фермі  $i$ -го металу,  $\varphi_i$  — його потенціал.

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{\mu_1 - \mu_2}{e}$$

В результаті різниці потенціалів дорівнює

Таким чином, контактна різниця потенціалів між двома металами визначається відносним положенням їхніх рівнів Фермі.

Важливою особливістю контакту металів є те, що на поверхні металів існують численні поверхневі рівні для електронів, що зменшує область подвійного зарядженого шару до кількох сталих кристалічної ґратки. При контакті металу й напівпровідника, або при контакті двох напівпровідників заряджені області набагато ширші, створюючи значні бар'єри для проходження електричного струму. Провідність таких контактів одностороння, що широко використовується в напівпровідниковій техніці.

Явище виникнення контактної різниці потенціалів лежить в основі термоелектричних ефектів, що дозволяє створення таких пристроїв як термопари.

### Робота виходу.

Робота виходу — найменша кількість енергії, яку необхідно надати електрону для того, щоб вивести його з твердого тіла у вакуум.

Робота виходу є характеристикою речовини.

Як і будь-яку іншу енергетичну характеристику роботу виходу можна вимірювати в джоулях, але це непрактично. Зазвичай роботу виходу заведено вимірювати в електронвольтах.

Негативно заряджені електрони притягаються до позитивно заряджених ядер атомів. У твердих тілах, зокрема металах, частина електронів відносно вільна — не зв'язана із конкретними атомами. Проте ці електрони зв'язані із загальною структурою металу. Для виходу за межі твердого тіла електрон повинен подолати силу притягання позитивно зарядженої кристалічної ґратки. Тому для виходу з твердого тіла електрон повинен мати певну характерну для даного твердого тіла енергію. Цю енергію він може надбати різними способами: випадково внаслідок теплового руху (термоелектронна емісія, поглинаючи квант світла (фотоефект), в зовнішньому електричному полі. Величина цієї мінімально необхідної енергії отримала назву роботи виходу.

Робота виходу є важливою характеристикою металів, яка визначає, чи може такий метал бути гарним електродом. Лужні метали мають найменші роботи виходу, проте їхнє використання обмежене низькою стійкістю щодо корозії.

Робота виходу деяких металів

Метал	Робота виходу (eV)
Натрій	2.3
Кальцій	2.9
Алюміній	4.08
Мідь	4.7
Золото	5.1
Платина	6.35

### Термопара.

Термопара — вимірювальний перетворювач, що використовується в устаткуванні для вимірювання температури, а також для прямого перетворення тепла в електрику в тих випадках, коли доцільно уникнути рухомих деталей (наприклад, у космосі). Поглинання тепла при проходженні електричного струму через контакт використовується в холодильниках тощо.

Принцип дії термопари базується на термоелектричних явищах. Термопара складається з двох провідників, сполучених кінцями так, що вони утворюють два контакти. Контакти поміщають в середовища з різною температурою.

Для вимірювання температури використовують ефект Зеебека. Термопара вимірює різницю температур, а не саму температуру. Тому для визначення значення температури один із кінців потрібно або помістити в термостат з відомою температурою, або ж вимірювати її якимось іншим способом.

Електрорушійна сила, яка виникає в термопарі між нагрітим і холодним кінцем може використовуватися як джерело живлення. Ефективність такого джерела невисока, але в певних умовах, наприклад, в космосі, далеко від Сонця, таке джерело незамінне, враховуючи відсутність рухомих частин. Для нагрівання гарячого кінця термопари в космічних апаратах використовують тепло від радіоактивного розпаду.

Термопари застосовують також у нагрівачах та холодильниках, використовуючи ефект Пельтьє. При проходженні електричного струму через контакти термопари один із них нагрівається, а другий охолоджується.

### **Термоелектронна емісія.**

Термоелектронна емісія — явище зумовленого тепловим рухом вільоту електронів за межі речовини.

Термоелектронна емісія суттєва для функціонування вакуумних ламп, в яких електрони випромінюються негативно зарядженим катодом. Для збільшення емісії катод зазвичай підігрівається ниткою розжарення.

При нагріванні металу енергетичний розподіл електронів в зоні провідності змінюється. З'являються електрони з енергією, що перевищує рівень Фермі. Незначна кількість електронів може набути енергію, яка перевищує роботу виходу. Такі електрони можуть вийти за межі металу, в результаті чого виникає емісія електронів. Величина струму термоелектронної емісії залежить від температури катода, роботи виходу та властивостей поверхні (рівняння Річардсона-Дешмана): 
$$j_e = AT^2 e^{-e\varphi_0/k_B T}$$

де:  $j_e$  — густина струму емісії;

$A$  - емісійна стала, яка залежить від властивостей випромінювальної поверхні і яка для більшості чистих металів лежить в межах 40-70 А/см<sup>2</sup>\*К<sup>2</sup>;

$T$  - абсолютна температура катода;

$e$  - основа натуральних логарифмів;

$e\varphi_0$  — робота виходу електрона із металу;

$k_B$  — стала Больцмана.

Наведене рівняння справедливе для металів. Для домішкових напівпровідників існує дещо інша залежність, однак кількісний зв'язок величини струму емісії залишається. Подане рівняння демонструє, що величина струму емісії найбільше залежить від температури катода. Однак при збільшенні

температури різко зростає швидкість випаровування матеріалу катода і скорочується строк його служби. Тому катод повинен працювати в строго визначеному інтервалі робочих температур. Нижній поріг визначається можливістю отримання бажаної емісії, а верхній — випаровуванням або плавленням матеріалу.

Суттєво впливає на величину струму емісії зовнішнє електричне поле, яке діє біля поверхні катода. Це явище отримало назву ефекта Шотткі. На електрон, що виходить із катода, при наявності зовнішнього електричного поля діють дві сили — електричного тяжіння, яка повертає електрон назад, і зовнішнього поля, що пришвидшує електрон у напрямі від поверхні катода. Таким чином, зовнішнє електричне поле зменшує потенційний бар'єр, внаслідок чого знижується робота виходу електронів із катода і збільшується електронна емісія.

Вплив зовнішнього пришвидшуючого поля особливо сильно проявляється у напівпровідникових катодах з поверхневим покриттям оксидами лужноземельних металів. Напівпровідникові катода мають шершаву поверхню, тому значно зростає напруженість зовнішнього електричного поля біля нерівностей поверхні, що викликає більш інтенсивний ріст струму емісії.

### **Електронні прилади.**

Електронний прилад (ЕП) — прилад, для перетворення електромагнітної енергії з одного виду в інший, в процесі взаємодії створених в електронному приладі електронних потоків, з електромагнітними полями, — в середовищі, яке заповнює внутрішній простір електронного приладу (вакуум, газ, напівпровідниковий матеріал, ін.).

Електронні прилади поділяються на електровакуумні прилади та напівпровідникові прилади.

Електровакуумний прилад (ЕВП) — електротехнічний або радіотехнічний прилад, для роботи якого потрібний високий вакуум або певний газ (іноді спеціальна суміш газів) при визначеному значенні тиску. Це диктує необхідність ізолювання робочого об'єму ЕВП від зовнішнього простору спеціальною газонепроникною оболонкою. Такі оболонки мають назву балон або колба і виготовляються зазвичай зі скла або металу (іноді вживаються балони металоскляного типу). Для подачі електричних напруг і сигналів на електроди ЕВП з оболонки виводяться з'єднані з електродами штирки (частина яких зазвичай об'єднується в цокольний роз'єм), за допомогою яких ЕВП підключається до зовнішніх електричних кіл.

Залежно від принципу дії ЕВП поділяють на

-безрозрядні ЕВП — струм в яких протікає тільки по провідникам, що знаходяться в робочому просторі ЕВП, (освітлювальні лампи, баретери, вакуумні термоелементи та ін.);

-електронні прилади — струм в яких виникає як результат направленої переміщення потоку електронів у вакуумі (електронні лампи, електронно-променеві трубки та ін.);

-газорозрядні прилади — (тиратрони, газотрони та ін.)

## Лекція №10. Електричний струм в різних середовищах (рідина, газ, вакуум). Напівпровідники в електричному полі – 2 год.

- План: 1. Електричний струм в рідинах.  
2. Електричний струм в газах.  
3. Самостійний і несамостійний газовий розряд. 4. Термоелектронна емісія.  
5. Вакуумні лампи.  
6. Механізм власної провідності напівпровідників  
7. Застосування напівпровідників.  
8. Діод

### Електричний струм в рідинах

Рідина — один з основних агрегатних станів речовини поряд із газом та твердим тілом. Від газу рідина відрізняється тим, що зберігає свій об'єм, а від твердого тіла тим, що не зберігає форму.

У рідині молекули здебільшого зберігають свою цілісність, хоча чимало рідин є розчинниками, в яких молекули до певної міри дисоціюють. При дисоціації в рідинах утворюються позитивно й негативно заряджені йони. Такі рідини проводять електричний струм.

Електроліти – це речовини, електричний струм у яких завжди супроводжується їх хімічними змінами. Це розчини солей, кислот і лугів у воді. У таких розчинах постійно відбувається розпад молекул на іони. Цей процес називається електролітичною дисоціацією. Внаслідок дисоціації в розчині утворюються позитивні (катіони) іони металів і водню, та негативні (аніони) іони кислотних залишків і гідроксильної групи. У стані динамічної рівноваги розчин характеризується ступенем дисоціації  $\gamma$  – відношенням числа  $n$  молекул, які

$$\gamma = \frac{n}{n_0}$$

дисоціювали на іони, до загального числа  $n_0$  молекул речовини:

Густину електричного струму в електроліті можна визначити за законом  
Ома: 
$$\vec{j} = \frac{\vec{E}}{\rho} = \alpha \vec{E}$$

При підвищенні температури питомий опір електроліту зменшується, а питома провідність збільшується. Проходження електричного струму через електроліт супроводжується явищем електролізу – виділення на електродах речовин, що входять до складу електроліту.

### Електричний струм в газах.

Гази за нормальних умов погано проводять електричний струм, тобто є ізоляторами. Газ складається з нейтральних атомів і молекул. Внаслідок зовнішніх дій (опромінювання ультрафіолетовим, рентгенівським, радіоактивним випромінюванням, нагрівання і т.д.) газ іонізується, тобто від атомів і молекул відриваються електрони. Внаслідок іонізації утворюються позитивні іони і електрони. Коефіцієнт іонізації  $\beta$  називають відношенням числа іонів  $N$ , що виникли, до числа молекул газу  $N_0$  в даному об'ємі.

$$\beta = \frac{N}{N_0}$$

Поряд з іонізацією відбувається зворотній процес – рекомбінація, тобто об'єднання іона і електрона в нейтральну молекулу або атом.

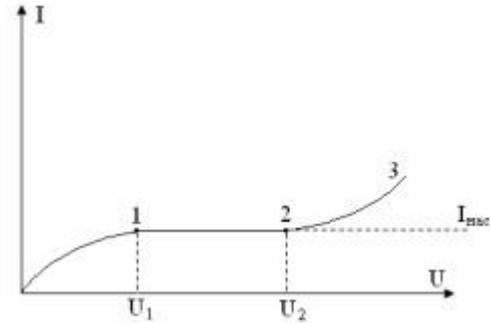
Енергію, яку потрібно затратити для іонізації газу, називають енергією іонізації. Для різних газів енергія іонізації має різне значення і залежить від будови атома чи молекули. Необхідна умова іонізації – надання електронам

значної швидкості:  $\frac{mV^2}{2} \geq A_i$

де  $A_i$  - робота іонізації,  $m$  і  $V$  – відповідні швидкість і маса електронів.

Процес проходження струму через газ називають газовим розрядом. Газовий розряд, який відбувається під дією іонізатора, називається несамостійним (ділянка 0 – 2).

Вольт – амперна характеристика (залежність сили струму в колі від напруги) має такий вигляд.



При несамостійному газовому розряді закон Ома не справджується (не існує пропорційної залежності між силою струму і прикладеною напругою). Починаючи з деякої напруги, сила струму не змінюється, настає насичення.

### Самостійний і несамостійний газовий розряд.

Газовий розряд — явище протікання електричного струму в газах.

Газ складається із нейтральних атомів і молекул, тому для забезпечення електропровідності необхідне виникнення носіїв заряду - іонізація. Джерелом іонізації може бути зовнішнє опромінення високоенергетичними фотонами - ультрафіолетовими, рентгенівськими чи гамма-променями. Іонізація може виникнути також у сильному електричному полі, або ж за рахунок зіткнень із прискореними носіями заряду (ударна іонізація). Додатковим джерелом носіїв заряду може бути поверхнева іонізація, наприклад термоелектронна емісія з катоду.

При малих зовнішніх електричних полях провідність газів зумовлена зовнішніми джерелами іонізації. Розряд, який виникає в таких умовах, називають несамостійним розрядом.

Розряди, які виникають у сильних електричних полях за рахунок іонізації, що виникає при протіканні струму, називаються самостійними газовими розрядами.

Розрізняють такі типи самостійних газових розрядів:

- Тліючий розряд
- Дуговий розряд
- Іскровий розряд
- Коронний розряд

Тліючий розряд виникає при низьких тисках ( $p \approx 0,01 - 1 \text{ мм. рт.ст.}$ ). Він виникає внаслідок ударної іонізації газу в трубці і додаткового вибивання електронів з катода позитивними іонами. Тліючий розряд використовується в газосвітних трубках для оформлення реклам, в лампах денного світла, в газових лазерах.

Коронний розряд (у самому електричному полі) виникає поблизу зарядженого гострого провідника. Він спостерігається при атмосферному тиску навколо проводів високовольтної лінії. Чим вища напруга, тим товщим має бути провід. У техніці коронний розряд використовують в електрофільтрах, призначених для очищення промислових газів від домішок. Коронний розряд призводить до втрати енергії.

Іскровий розряд виникає у разі великої напруженості електричного поля (30000 В/см). Між електродами виникає електрична іскра, яка має вигляд дуже яскравої смуги складної форми.

Іскровий розряд має переривчастий характер, бо після пробією напруга на електродах значно спадає через те, що проміжок між електродами коротко замикається. Прикладом іскрового розряду є блискавка, пробій діелектрика.

Дуговий розряд. Якщо в колі є потужне джерело, то іскру можна перетворити в електричну дугу. Дуга виникає, якщо привести в контакт, а потім поступово розсовувати два вугільні електроди, які перебувають під напругою. Дуговий розряд виникає тоді, коли внаслідок нагрівання катода основною причиною іонізації газу є термоелектронна емісія – випромінювання електронів дуже нагрітими тілами. Дуговий розряд використовують під час зварювання металів, для освітлення, в дугових електропечах.

#### **Термоелектронна емісія.**

Термоелектронна емісія — явище зумовленого тепловим рухом вільноти електронів за межі речовини.

Термоелектронна емісія суттєва для функціонування вакуумних ламп, в яких електрони випромінюються негативно зарядженим катодом. Для збільшення емісії катод зазвичай підігрівається ниткою розжарення.

При нагріванні металу енергетичний розподіл електронів в зоні провідності змінюється. З'являються електрони з енергією, що перевищує рівень Фермі. Незначна кількість електронів може набути енергію, яка перевищує роботу виходу. Такі електрони можуть вийти за межі металу, в результаті чого виникає емісія електронів. Величина струму термоелектронної емісії залежить від температури катода, роботи виходу та властивостей поверхні (рівняння

Річардсона-Дешмана):  $j_e = AT^2 e^{-e\phi_0/k_B T}$

де:  $j_e$  — густина струму емісії;

$A$  - емісійна стала, яка залежить від властивостей випромінювальної поверхні і яка для більшості чистих металів лежить в межах 40-70 А/см<sup>2</sup>\*К<sup>2</sup>;

$T$  - абсолютна температура катода;

$e$  - основа натуральних логарифмів;

$e\phi_0$  — робота виходу електрона із металу;

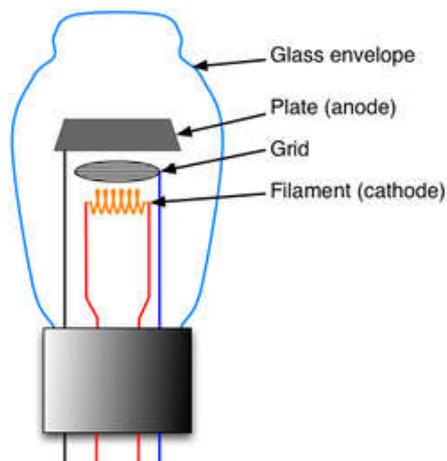
$k_B$  — стала Больцмана.

Наведене рівняння справедливе для металів.

Суттєво впливає на величину струму емісії зовнішнє електричне поле, яке діє біля поверхні катода. Це явище отримало назву ефекта Шоттки. На електрон, що виходить із катода, при наявності зовнішнього електричного поля діють дві сили — електричного тяжіння, яка повертає електрон назад, і зовнішнього поля, що пришвидшує електрон у напрямі від поверхні катода. Таким чином, зовнішнє

електричне поле зменшує потенційний бар'єр, внаслідок чого знижується робота виходу електронів із катода і збільшується електронна емісія.

### Вакуумні лампи.



Електровакуумна лампа або Електронна лампа (ЕЛ) — електровакуумний прилад, що призначений для різноманітних перетворень електричних величин шляхом утворення потоку електронів та його керуванням.

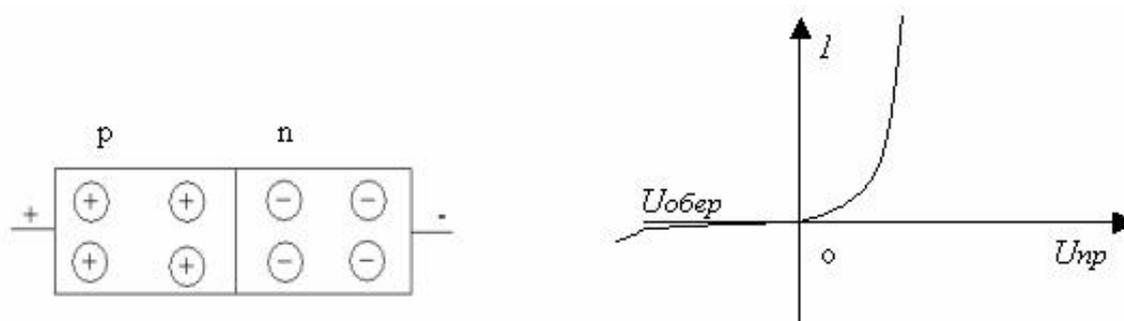
Електровакуумна лампа або Електронна лампа (ЕЛ) — електровакуумний прилад, що призначений для різноманітних перетворень електричних величин шляхом утворення потоку електронів та його керуванням.

### Струм в напівпровідниках.

Напівпровідники – це речовини, в яких електропровідність займає проміжне місце між провідниками і діелектриками. До напівпровідників належать кремній, селен, хімічні з'єднання елементів III групи з елементами V групи. Питомий опір напівпровідників знаходиться в межах від  $10^4$  до  $10^5$  Ом · м. В результаті відриву електронів від атома виникають вільні електрони. Вакантне місце (позитивно заряджений іон) для електрона утворює так звану дірку. Дірка відповідає надлишковий позитивний заряд порівняно з сусідніми неіонізованими атомами, тому рух дірки рівнозначний рухові позитивного заряду. Якщо внести провідник в зовнішнє електричне поле, то хаотичний рух дірок і електронів переходить в напрямлений. Струм в таких провідниках зумовлений як рухом електронів і дірок (власна провідність). Концентрація дірок і електронів однакова. Власна провідність напівпровідників мала. Незначна кількість домішок у провідниках значно підвищує провідність їх. Домішки зумовлюють додаткову (домішкову) провідність. Домішкова провідність буває донорною і акцепторною. Домішки, які віддають електрони називаються донорами, а напівпровідники з електронною провідністю – електронними напівпровідниками (n – типу). Електронну провідність отримують, коли валентність елемента, що додається, більша за валентність основного напівпровідника. Наприклад, до германію (IV- валентний) додати миш'як (V - валентний). У таких напівпровідниках рух дірок майже відсутній. Якщо домішки мають валентність меншу, ніж основний напівпровідник, їх називають акцепторами, а напівпровідник – дірковим напівпровідником (p – типу). В перекладі n – тип (негативний), p – тип (позитивний). При контакті двох напівпровідників n – типу і p – типу на їх межі внаслідок дифузії і рекомбінації електронів і дірок виникає тонкий шар, збіднений носіями струму, який має підвищений опір (p – n – перехід). Якщо ввімкнути напівпровідник з p – n – переходом в електричне коло так, щоб потенціал частини з p – провідністю був позитивним, а частини з n – провідністю –

негативним, то через нього буде проходити струм. Такий перехід називають прямим (Рис. 41). Якщо знаки потенціалів на кінцях напівпровідника поміняти, то зворотній струм буде досить малим, а опір провідника досить великий. Такий перехід називають зворотнім.

Властивості p – n – переходу ( малий опір у прямому напрямі і великий у зворотному) використовують для випрямлення змінного струму (напівпровідникові діоди).



### Власна і домішкова провідність.

Між парою сусідніх атомів існує так званий парноелектронний зв'язок, або ковалентний. Чотири валентні електрони кожного атома вступають у ковалентний зв'язок з електронами сусідніх атомів. Так, що вільних електронів у чистому германію немає. А нема вільних носіїв заряду, то й не буде проходити електричний струм. (Яка умова існування електричного струму?).

Ковалентні зв'язки досить міцні і при низьких температурах напівпровідники є діелектриками.

3. Від нагрівання германію кінетична енергія валентних електронів зростає і окремі зв'язки розриваються.

В результаті цього частина електронів, які раніше брали участь в утворенні валентних зв'язків, відщеплюються і стають електронами провідності. За наявності електричного поля вони переміщуються проти поля і утворюють електричний струм. Як у металах (електронна провідність).

Але на відміну від металів у напівпровідників є ще інші механізми провідності. Коли розривається зв'язок, то утворюється вакантне місце, де не вистачає електрона. Його називають діркою. Дірка веде себе як позитивно заряджена частинка.

З підвищенням температури кількість розірваних зв'язків, отже вільних електронів, збільшується. Збільшується і кількість дірок. Під час руху електронів, електрони можуть займати вакантні місця (дірки) при цьому відновлюються валентні зв'язки.

Дірка переміщується у кристалі у протилежний бік від руху електронів.

Приклад: вільні місця у класі (залі).

Рух електронів і дірок хаотичний, якщо напруженість електричного поля дорівнює 0.

При наявності електричного поля виникає упорядковане переміщення дірок у напрямі вектора напруженості, і упорядковане переміщення електронів проти руху дірок.

Отже, у напівпровідників є носії зарядів двох типів: електрони і дірки. Тому напівпровідники мають не тільки електронну, а й діркову провідність. Ми розглянули механізм провідності ідеальних (чистих) напівпровідників. Провідність чистих напівпровідників називають власною провідністю напівпровідників.

Провідність напівпровідників у великій мірі залежить від домішок. Саме ця залежність зробила напівпровідники тим, чим вони стали в сучасній техніці.

При наявності домішок, крім власної провідності, виникає додаткова – домішкова провідність.

Змінюючи концентрацію домішки, можна змінювати кількість носіїв заряду того чи іншого знаку. Завдяки цьому створюються напівпровідники з переважною концентрацією – або від'ємно, або додатно заряджених носіїв. Ця особливість напівпровідників і відкриває широкі можливості для їх практичного застосування.

Отже, домішки можуть збільшувати концентрацію електронів провідності і створювати в напівпровіднику електронну домішкову провідність n-типу (негативний). Такі домішки називаються донорними. У напівпровіднику n-типу електрони – основні носії заряду, дірки – неосновні.

### **Напівпровідникові прилади.**

Напівпровідникові прилади, електронні прилади, дія яких заснована на електронних процесах в напівпровідниках. У електроніці н. п. служать для перетворення різних сигналів, в енергетиці — для безпосереднього перетворення одних видів енергії в інших.

Відоме багато всіляких способів класифікації н. п., наприклад за призначенням і принципу дії, за типом матеріалу, конструкцією і технологією, по сфері застосування. Проте до основних класів н. п. відносять наступні: електроперетворювальні прилади, що перетворюють одні електричні величини в ін. електричні величини ( напівпровідниковий діод, транзистор, тиристор ) ; оптоелектронні прилади, що перетворюють світлові сигнали в електричних і навпаки ( оптрон, фоторезистор, фотодіод, фототранзистор, фототиристор . напівпровідниковий лазер, світловипромінюючий діод, твердотілий перетворювач зображення — аналог відікона і т.п.); термоелектричні прилади, що перетворюють теплову енергію в електричну і навпаки ( термоелемент, термоелектричний генератор, сонячна батарея, термістор і т.п.); магнітоелектрич. прилади (датчик, що використовує Холу ефект, і т.п.); п'єзоелектричний і тензометричеський прилади, які реагують на тиск або механічний зсув. До окремого класу н. п. слід віднести інтегральні схеми, які можуть бути такими, що електроперетворюють, оптоелектронними і т.д. або змішаними, поєднуючими самі різні ефекти в одному приладі. Електроперетворювальні н. п. — найбільш широкий клас приладів, призначених для перетворення (по роду струму, частоті і т.д.), посилення і генерування електричних коливань в діапазоні частот від доль гц до 100 Ггц і більш; їх робочі потужності знаходяться в межах від < 10 -12 Вт до декількох сотень Вт, напруга — від доль в до декількох тис. в і струмі — від декількох на до декількох тис. а . Залежно від вживаного напівпровідникового матеріалу розрізняють германієві, кремнієві і ін. н. п. По конструктивних і технологічних ознаках н. п. розділяють на точкових і площинних; останні, у свою чергу, ділять на

сплавних, дифузійних, мезапланарніє, планарніє (найбільш поширені, див.(дивися) Планарная технологія ) , епіпланарніє і ін. Відповідно до області вживання розрізняють високочастотні, високовольтні, імпульсні і ін. н. п.

Н. п. випускають в металоскляних, металокерамічних або пластмасових корпусах, що захищають прилади від зовнішніх дій; для використання в гібридних інтегральних схемах випускаються т.з. безкорпусні н. п. (див. Мікроелектроніка ) . Номенклатура н. п., що випускаються у всіх країнах налічує близько 100 000 типів приладів різного призначення.

## Модуль 5. Електромагнетизм

### Лекція №11. Електромагнетизм Електромагнітна індукція – 2 год.

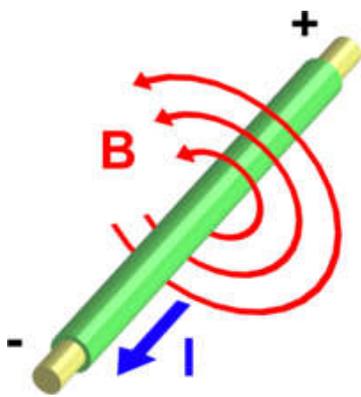
1. Магнітне поле. Взаємодія струмів.
2. Закон Ампера. Закон Біо – Савара – Лапласа.
3. Сила Лоренца..
4. Досліди Фарадея.
5. Закон електромагнітної індукції.
6. Індуктивний струм. Індуктивність.
7. Явище само- і взаємоіндукції.
8. Трансформатор. Енергія магнітного поля.

#### Магнітне поле.

Магнітне поле — особлива форма матерії, за допомогою якої здійснюється взаємодія між рухомими електрично зарядженими частинками.

Магнітне поле - складова електромагнітного поля, яка створюється

змінним у часі електричним полем, рухомими електричними зарядами або спінами заряджених частинок. Магнітне поле спричиняє силову дію на рухомі електричні заряди. Нерухомі електричні заряди магнітним полем не взаємодіють, але елементарні частинки з ненульовим спіном, які мають власний магнітний момент, є джерелом магнітного поля і магнітне поле спричиняє на них силову дію, навіть якщо вони перебувають у стані спокою.



Магнітне поле утворюється, наприклад, у

просторі довкола провідника, по якому тече струм або довкола постійного магніту.

Магнітне поле є векторним полем, тобто з кожною точкою простору пов'язаний вектор магнітної індукції  $\mathbf{B}$  який характеризує величину і напрям магнітного поля у цій точці і може мінятися з плином часу. Поряд з вектором електромагнітної індукції  $\mathbf{B}$ , магнітне поле також описується вектором напруженості  $\mathbf{H}$ .

Магнітне поле вимірюється магнітометрами. Механічні магнітометри визначають величину поля за відхиленням котушки зі струмом. Слабкі магнітні поля вимірюються магнітометрами на основі ефекту Джозефсона - СКВІДами. Магнітне поле можна також вимірювати на основі ефекту ядерного магнітного резонансу, ефекту Хола та іншими методами.

Магнітне поле широко використовується в техніці й для наукових цілей. Для його створення використовуються постійні магніти та електромагніти. Однорідне магнітне поле можна отримати за допомогою котушок Гельмгольца. Для створення потужних магнітних полів, необхідних для роботи прискорювачів або для утримання плазми в установках з ядерного синтезу, використовуються електромагніти на надпровідниках.

#### Взаємодія струмів.

Якщо по двох паралельних і не закріплених провідниках пропустити постійний електричний струм то вони будуть притягуватись. Якщо ж струми будуть антипаралельні, то вони відштовхуються. Класична теорія електропровідності металів пояснює причину цього явища наступним чином.

Метал має вільні електрони (електронний газ), розподілений всередині іонної ґратки. Сумарний заряд додатньо зарядженої іонної ґратки і від'ємно зарядженого електронного газу рівний нулю; заряди розподілені в провіднику рівномірно, так що система не має дипольного моменту. Внаслідок цього сумарна напруженість електричного поля іонної ґратки і електронного газу рівна нулю, і навколо провідника відсутнє електричне поле. І тому провідники при відсутності струму не взаємодіють друг з другом.

При наявності електричного струму, тобто направлено руху вільних електронів, між провідниками виникає сила взаємодії. Це приводить до висновку, що сили взаємодії між рухомими електричними зарядами відрізняються від сил взаємодії між нерухомими зарядами. З історичних міркувань ці сили називають магнітними.

Згідно закону Біо-Савара-Лапласа кожний провідник з струмом створює навколо себе магнітне поле. Розглянемо взаємодію між двох прямолінійних нескінченно довгих провідників з струмом, розташованих паралельно один до одного на відстані.

Взаємодію паралельних струмів легко пояснити і взяти за основу в означенні основної одиниці сили струму в СІ -1А. Дійсно, кожний з провідників створює в просторі навколо себе магнітне поле, яке в відповідності з законом Ампера діє на другий провідник з струмом.

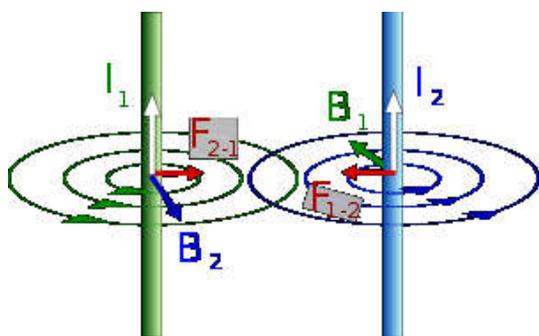
Визначивши силу, з якою діє магнітне поле другого провідника на провідник з струмом, і аналогічно силу , і порівнявши їх, можна зробити висновок, що вони рівні між собою і направлені протилежно. За одиницю сили струму СІ взято ампер (А) – сила такого незмінюючого струму, який при проходженні по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини і малої площі яолового поперечного перерізу, розташованих в вакуумі на відстані 1 м один від другого, визнає би на кожній ділянці провідника довжиною 1 м силу взаємодії, рівну  $2 \cdot 10^{-7}$  Н.

### Закон Ампера.

Закон Ампера — закон взаємодії постійних струмів. Установлений Андре-Марі Ампером в 1820 році. Із закону Ампера виходить, що паралельні провідники з постійним струмом, поточними в одному напрямі, притягуються, а в протилежному — відштовхуються. Законом Ампера

називається також закон, що визначає силу, з якою магнітне поле діє на малий відрізок провідника із струмом.

$$d\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B}dV$$



Сила Ампера - це сила, яка діє на провідник із електричним струмом з боку магнітного поля.

Сила Ампера залежить від:

- сили струму  $I$
- елемента (частини) довжини провідника  $dl$
- кута між напрямом струму і напрямом ліній магнітного поля  $\alpha$ ,
- магнітної індукції  $B$

$$dF = B I dl \sin \alpha$$

У векторній формі сила Ампера записується

$$d\mathbf{F} = I[\mathbf{B}, d\mathbf{l}]$$

Якщо кут між векторами  $B$  і  $I < 90^\circ$ :

$$F = B I l \sin \alpha - \text{сила Ампера}$$

$B = 1$  Тл(Тесла) - індукція магнітного поля

$I = 1$  А(Ампер) - сила струму

$l = 1$  м(метр) - довжина провідника

- кут між векторами  $B$  і  $I$

Якщо кут між векторами  $B$  і  $I = 90^\circ$ , тоді  $\sin 90^\circ = 1$ , звідси:

$$F = B I l.$$

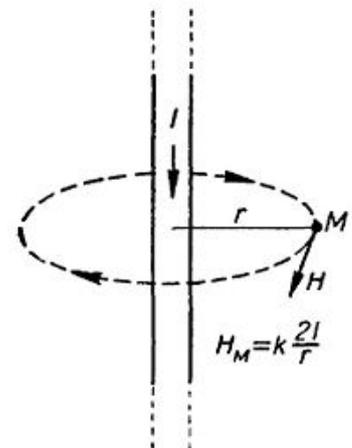
### Закон Біо – Савара – Лапласа.

Біо-Савара-Лапласа закон — закон, який визначає напруженість магнітного поля електричного струму, що тече у прямолінійному дуже довгому провіднику.

$$H = k \frac{2I}{r}$$

За законом Біо-Савара

де  $H$  — напруженість магнітного поля в точці  $M$  на відстані  $r$  від прямолінійного провідника із струмом  $I$  (мал. 1);  $k$  — коефіцієнт пропорційності, величина і розмірність якого залежать від вибору системи одиниць,  $r$  — радіусвектор.



Закон Біо-Савара експериментально відкрили 1820 Жан-Батіст Біо і Фелікс Савар. Цей закон є частковим випадком більш загального закону Біо-Савара-Лапласа, сформульованого П. Лапласом 1820 на підставі матеріалів з численних дослідів Ж.-Б. Біо і Ф. Савара.

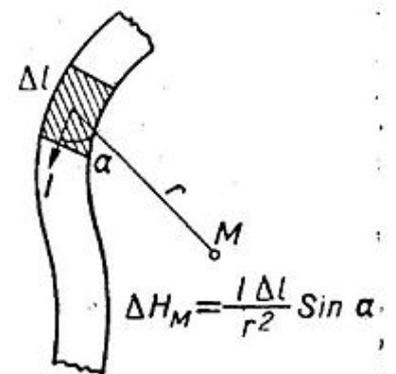
За цим законом величина напруженості магнітного поля в точці  $M$  на відстані  $r$  від елемента  $M$  провідника довільної форми

визначається формулою:

$$\Delta H = k \frac{I \Delta l}{r^2} \sin \alpha$$

де  $\alpha$  — кут між напрямом струму  $I$  і напрямом радіуса-вектора  $r$ . Повна напруженість магнітного поля  $H$ , створеного струмом у провіднику довільної форми і скінченної довжини, дорівнює геометричній сумі елементарних напруженостей.

Наприклад, інтегруванням одержують



формули напруженості магнітного поля навколо нескінченно довгого прямолінійного провідника зі струмом, тобто формулу Б. — С. з., напруженість

магнітного поля в центрі колового струму 
$$H = k \frac{2\pi I}{r} .$$

напруженість магнітного поля в середній частині дуже довгого соленоїда  $H = k4\pi In$  та ін. Напрямок напруженості магнітного поля в усіх випадках визначається за правилом сверлика.

### Сила Лоренца.

Сила Лоренца - сила, що діє на електричний заряд, який перебуває у електромагнітному полі.

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + \frac{q}{c}[\mathbf{v} \times \mathbf{B}]$$

Тут  $\mathbf{F}$  - сила,  $q$  - величина заряду,  $\mathbf{E}$  - напруженість електричного поля,  $\mathbf{v}$  - швидкість руху заряду,  $\mathbf{B}$  - вектор магнітної індукції.

Електричне поле діє на заряд із силою, направленою вздовж силових ліній поля. Магнітне поле діє лише на рухомі заряди. Сила дії магнітного поля перпендикулярна до силових ліній поля й до швидкості руху заряду.

Названа на честь Гендріка Лоренца, який розробив це поняття 1895 року.

В теорії відносності сила Лоренца записується в коваріантній формі

$$f^i = \frac{q}{c} F^{ik} u_k$$

де  $f^i$  - 4-вектор сили,  $u_k$  - 4-швидкість, а  $F^{ik}$  - 4-тензор електромагнітного поля.

### Діа-, пара-, ферромагнетики.

Діамагнетик — речовина з від'ємною магнітною сприйнятливістю.

Явище діамагнетизму зумовлене ларморівською прецесією електронів у магнітному полі.

Процеси, які визначають діамагнітні властивості речовини, відбуваються у всіх без винятку матеріалах, але вони слабкі й у випадку парамагнетиків не грають суттєвої ролі порівняно із іншими процесами.

Ідеальний діамагнетик має магнітну сприйнятливість рівну  $-1$ , що призводить до виштовхування магнітного поля із речовини. Ідеальними діамагнетиками є надпровідники.

Парамагнетики— речовини з невеликою позитивною магнітною сприйнятливістю, які у зовнішньому магнітному полі намагнічуються вздовж поля і дещо підсилюють його.

Атоми парамагнетиків мають свій магнітний момент. Магнітна сприйнятливість парамагнетиків завжди додатня і лежить у діапазоні  $10^{-4}$  —  $10^{-7}$ . До парамагнетиків належать:

-речовини, атоми або молекули яких мають непарне число електронів ( $N_a, N$ );

-вільні атоми (йони) з недобудованою внутрішньою електронною оболонкою (елементи перехідної групи, їх солі і водні розчини,

-комплексні сполуки перехідних елементів, рідкісні землі, актиніди, вільні радикали);

-багато лужних і лужноземельних металів, Al, Sc, V; кисень O<sub>2</sub>, NO.

-Феромагнетики та антиферомагнетики при температурах, вищих від температур Кюрі та Нееля, відповідно.

Феромагнетики — деякі метали (залізо, нікель, кобальт, гадоліній, манган, хром та їхні сплави) з великою магнітною проникністю, що проявляють явище гістерезису; розрізняють м'які феромагнетики з малою коерцитивною силою та тверді феромагнетики з великою коерцитивною силою. Феромагнетики використовуються для виробництва постійних магнітів, осердь електромагнітів та трансформаторів.

Феромагнетизм виникає в речовинах, у яких як наслідок обмінної взаємодії, спінам електронів вигідно орієнтуватися паралельно. В результаті такої узгодженої орієнтації спінів виникає макроскопічний магнітний момент, який може існувати навіть без зовнішнього магнітного поля. При температурі, яка перевищує певну критичну (температура Кюрі), зумовлене тепловим рухом хаотичне розупорядкування бере гору над обмінною взаємодією й феромагнетик переходить в парамагнітний стан.

### **Гістерезис.**

Гістерезис— неоднозначна залежність змін фізичної величини, яка означає стан тіла, від зміни іншої фізичної величини, яка визначає зовнішні умови (напруженість магнітних  $H$  та електричних  $E$  полів). Гістерезис спостерігається в тих випадках, коли стан тіла визначається зовнішніми умовами не лише в даний момент часу але й попередні моменти, тобто, коли стан системи залежить від її минулого (історії).

Гістерезис означає ненакладання перебігу змін у протилежних напрямках (незбіжність кривих, що описують такі зміни).

Розрізняють гістерезис:

-магнітний;

-діелектричний;

-пружний;

-магнітострикційний;

-температурний;

-термомагнітний та інші.

### **Гіпотеза Ампера.**

Відкриття Ерстеда і Ампера призвели до нового і більш глибокому уявленню про природу магнітних явищ. Спираючись на встановлену в цих дослідах тотожність магнітних дій магнітів і відповідним, підібраних струмів, Ампер рішуче відмовився від уявлення про існування в природі особливих магнітних зарядів. З точки зору Ампера, елементарний магніт - це круговий струм, що циркулює усередині невеликої частки речовини: атома, молекули або групи їх. При намагнічуванні більша або менша частина таких струмів встановлюється паралельно один одному.

Таким чином, теорія Ампера зробила непотрібним допущення про існування особливих магнітних зарядів, дозволивши пояснити всі магнітні явища за допомогою елементарних електричних струмів. Подальше більш глибоке вивчення властивостей намагнічуються тел показало не тільки, що гіпотеза магнітних зарядів або елементарних магнітників зайва, але що вона неправильна і не може бути узгоджена з деякими експериментальними фактами. З точки зору теорії Ампера стає цілком зрозумілою невіддільність один від одного північних і південних полюсів, про яку ми говорили в попередньому параграфі. Кожен елементарний магніт являє собою круговою виток струму. Ми бачили вже, що одна сторона цього витка відповідає північного, інша - південного полюса. Саме тому не можна відокремити один від одного північний і південний полюси, як не можна відокремити один бік площини від іншої.

Ніяких магнітних зарядів не існує. Кожен атом речовини можна розглядати у відношенні його магнітних властивостей як круговий струм. Магнітне поле намагніченого тіла складається з магнітних полів цих кругових струмів.

У ненамагніченим тілі всі елементарні струми розташовані хаотично, і тому ми не спостерігаємо у зовнішньому просторі ніякого магнітного поля.

Процес намагнічування тіла полягає в тому, що під впливом зовнішнього магнітного поля його елементарні струми в більшій чи меншій мірі встановлюються паралельно один одному і створюють результуюче магнітне поле.

### **Досліди Фарадея.**

Найбільш наочний прояв електромагнітної індукції було отримано Фарадеєм за допомогою нехитрого приладу. На залізне кільце намотувалися дві окремі спіралі, з яких одна поєднувалася з батареєю, а інша - з гальванометром. При замиканні першого ланцюга спостерігалось різке відхилення стрілки гальванометра, при розмиканні ланцюга спостерігалось відхилення протилежного знака. Цей важливий досвід, всіяко видозмінюються, Фарадеєм дозволив «отримати електрику з магнетизму» найпростішим, зараз добре відомим способом: достатньо вводити магніт в спіральний провідник, з'єднаний з гальванометром, щоб отримати відхилення стрілки в один бік; при виведенні магніту з спіралі стрілка відхиляється в протилежну сторону.

У 1824 р. Араго зауважив, що масивний мідний корпус досить сильно сповільнює колювання стрілки компаса. Це спостереження наштовхнуло його на думку поставити свій знаменитий досвід, в ході якого виявилось відхилення магнітної стрілки при обертанні мідного диска, розташованого над або під нею. Придумані для пояснення цього явища теорії були настільки штучні, що для більшості вчених досвід Араго так і залишився загадкою. Після відкриття явища електромагнітної індукції Фарадей подумав, що виявлене Араго явище може також пояснюватися появою індуктивних струмів в диску. Щоб переконатися в цьому, Фарадей став обертати мідний диск між полюсами магніту, приєднавши кінці ланцюга гальванометра один до осі, а інший до краю диска. При обертанні диска гальванометр вказував на наявність струму постійного напрямку, величина якого мінялася залежно від швидкості

обертання диска. Цим досвідом Фарадей не тільки встановив нове фізичне явище, але і дав перший зразок генератора електричного струму, відмінного від батареї, тобто дав цим перший поштовх до розвитку потужної сучасної електротехнічної промисловості з її найрізноманітніші практичними застосуваннями.

Однак Фарадея не цікавили практичні застосування. Проведений досвід дозволяв виявити якісні закони явища індукції. З цього досвіду Фарадей вивів правило, що дозволяє визначити напрямок струму в прямолінійній провіднику, що рухається перед полюсом магніту. Саме у зв'язку з цим Фарадей вперше говорить про «магнітних кривих»: «Під магнітними кривими я розумію лінії магнітних сил, хоча і перекручені сусідством полюсів; ці лінії вимальовуються залізними тирсою; до них щодо розташовувалися б дуже малі магнітні стрілочки ».

Фарадей видозмінював свої досліди самими різними способами: застосовував і ниткоподібним провідники, і дископодібні, обертав то магніт по відношенню до електричного контуру, то контур щодо магніту або землі. У результаті він прийшов до висновку, що електрорушійна сила індукції НЕ залежить від природи провідника, і висунув наступну теорію щодо цього явища, в загальних рисах, що залишилася незмінною з 1831 р. до наших днів: «Коли через дріт проходить електричний струм, то цей дріт у всіх своїх точках оточений магнітними кривими, інтенсивність яких зменшується з відстанню; подумки можна уподібнити їх кілець, розташованим в площинах, перпендикулярних проводу, або, вірніше, що протікає в ньому току. Хоча і відмінні за формою, ці криві є цілком аналогічними тим, які існують між двома зверненими один до одного різнойменними полюсами. Коли другий дріт, паралельний тому, який несе струм, наближають до останнього, то він проходить через магнітні криві точно того ж роду, що він перетинав б при своєму переміщенні в певному напрямку між протилежними полюсами ».

Якщо ні переміщення індують провідника щодо провідника, в якому індуються струм, то ток не з'являється, тому що тоді силові лінії не перетинаються. Коли індують провідник віддаляється від другого провідника, силові лінії перетинаються в протилежному напрямі і виникає струм також йде у зворотному напрямку. Якщо обидва провідника нерухомі, то при включенні струму в індують провіднику відбувається те ж саме, як якби магнітні криві рухалися «... з моменту, коли вони починають розвиватися, і аж до того моменту, коли магнітна сила струму досягає найбільшого значення; вони як би поширюються в сторони від проводу і, отже, виявляються по відношенню до нерухомого, індуюваного проводу в тому ж положенні, як якби він рухався в протилежному напрямку поперек них або за направленням до несучої ток проводу ».

У цих небагатьох словах полягають дуже важливі й нові думки: перша опис електромагнітного поля, думка про залежність інтенсивності поля від числа магнітних кривих, розповсюдження в часі магнітних збурень.

Дослідженнями в цьому новому напрямку, зазначеному Фарадеем, зайнялися багато фізиків: Джозеф Генрі (1797-1878), який, як вважають американці, ще до Фарадея відкрив явище індукції, виявив також явище самоіндукції.

### **Закон електромагнітної індукції.**

Електромагнітна індукція — виникнення електрорушійної сили у провіднику, що перебуває у змінному Явище електромагнітної індукції відкрив у 1831 році Майкл Фарадей. До того було відомо, що електричний струм у провіднику створює магнітне поле. Однак оберненого явища не спостерігалось. Постійне магнітне поле не створює електричного струму. Фарадей встановив, що струм виникає при зміні магнітного поля. Якщо підносити й віддаляти до рамки з провідного матеріалу постійний магніт, то стрілка підключеного до рамки вольтметра відхилитиметься, детектуючи електричний струм. Ще краще це явище проявляється, якщо вставляти (виймати) магнітне осердя в котушку з намотаним провідником.

Закон електромагнітної індукції в диференціальній формі задається другим рівнянням Максвелла

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

де  $\mathbf{E}$  - напруженість електричного поля,  $\mathbf{B}$  - магнітна індукція,  $c$  - швидкість світла у вакуумі.

Електричне поле, яке виникає при зміні магнітного поля призводить до появи електрорушійної сили.

Явище електромагнітної індукції використовується у генераторах електричного струму трансформаторах, динамо-машинах, лічильниках електроенергії тощо, тобто є основою виробництва й споживання електричної енергії.

### **Індуктивний струм. Індуктивність**

Індуктивність — фізична величина, що характеризує здатність провідника нагромаджувати енергію магнітного поля, коли в ньому протікає електричний струм.

Позначається здебільшого латинською літерою  $L$ , в системі СІ вимірюється в Генрі.

Дорівнює відношенню магнітного потоку  $\Phi$  через контур, визначений електричним колом, до величини струму  $I$  в колі, тобто

$$L = \Phi / I.$$

Енергія магнітного поля, створеного електричним струмом у колі, визначається формулою

$$E = \frac{1}{2} LI^2$$

Індуктивність залежить від форми контура.

У випадку кількох контурів зі струмом, як, наприклад, у випадку трансформатора, струм у кожному з кіл впливає на потік магнітного поля через інші контури.

$$\Phi_i = \sum_j L_{ij} I_j$$

Коефіцієнти  $L_{ij}$  називаються коефіцієнтами індукції. Діагональні елементи  $L_{ii}$  суть індуктивності і-тих контурів, а недіагональні елементи  $L_{ij}$ , де  $i \neq j$ , мають назву коефіцієнтів взаємної індукції. Коефіцієнти взаємної індукції симетричні відносно перестановки індексів.

$$L_{ij} = L_{ji}$$

Це твердження носить назву теореми взаємності.

### Явище само- і взаємоіндукції.

Самоіндукція — явище виникнення електрорушійної сили в провіднику при зміні електричного струму в ньому. Знак електрорушійної сили завжди такий, що вона протидіє зміні сили струму. Самоіндукція призводить до скінченного часу наростання сили струму при вмиканні джерела живлення і спадання струму при розмиканні електричного кола.

Величина електрорушійної сили самоіндукції визначається за

формулою 
$$\mathcal{E} = -L \frac{dI}{dt}$$

де  $\mathcal{E}$  — е.р.с.,  $I$  — сила струму,  $L$  — індуктивність.

Явище самоіндукції виникає в провідниках зі змінним струмом, навколо яких створюється змінне магнітне поле. Власне магнітне поле контура створює магнітний потік самоіндукції  $\Phi_{ms}$  через поверхню  $S$ , що обмежена цим

контуром: 
$$\Phi_{ms} = \int_S B_n dS$$

де  $B_n$  — проекція вектора індукції магнітного поля струму на нормаль до  $dS$  елемента поверхні. За законом Біо-Савара-Лапласа магнітна індукція  $d\mathbf{B}$  в точці, що знаходиться на віддалі  $r$  від елемента  $d\mathbf{l}$  контура зі струмом  $I$ , дорівнює:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I}{r^3} [d\mathbf{l}, \mathbf{r}] \quad \text{звідки знаходимо} \quad \mathbf{B} = \oint_l d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \oint_l \frac{\mu}{r^3} [d\mathbf{l}, \mathbf{r}]$$

де інтегрування розповсюджується на всю довжину  $l$  контура зі струмом. Проекція вектора  $d\mathbf{B}$  на деякий напрям  $\mathbf{n}$  запишеться у вигляді:

$$B_n = \frac{\mu_0}{4\pi} I \oint_l \frac{\mu}{r^3} [d\mathbf{l}, \mathbf{r}]_n$$

Підставляючи  $B_n$  у вираз для магнітного потоку самоіндукції,

отримуємо: 
$$\Phi_{ms} = \int_S B_n \frac{\mu_0}{4\pi} I \oint_l \frac{\mu}{r^3} [d\mathbf{l}, \mathbf{r}]_n dS$$

де  $\mathbf{r}$  — радіус-вектор, проведений із початку вектора  $d\mathbf{l}$  в центр елемента поверхні  $dS$ .

Взаємоіндукція (взаємна індукція) - виникнення електрорушійної сили (ЕРС) в одному провіднику внаслідок зміни сили струму в іншому провіднику або внаслідок зміни взаємного розташування провідників. Взаємоіндукції - окремий випадок більш загального явища - електромагнітної індукції. При зміні струму в одному з провідників або при зміні взаємного розташування провідників відбувається зміна магнітного потоку, створеного струмом перший

провідника і проходить через контур другого, що за законом електромагнітної індукції викликає виникнення ЕРС у другому провіднику. Якщо другий провідник замкнений, то під дією ЕРС взаємоіндукції в ньому утворюється індукований струм. І навпаки, зміна струму в другій ланцюга викличе появу ЕРС у першій. Напрямок струму, який виник при взаємоіндукції, визначається за правилом Ленца. Правило вказує на те, що зміна струму в одного ланцюга (катушці) зустрічає протидію з боку іншої ланцюга (катушки).

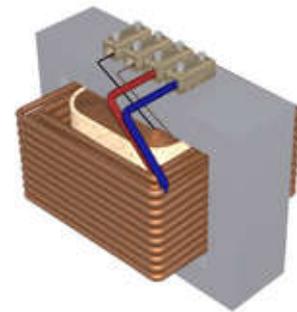
Чим більша частина магнітного поля першої ланцюга пронизує другий ланцюг, тим сильніше взаємоіндукції між ланцюгами. З кількісного боку явище взаємоіндукції характеризується взаємною індуктивністю. Для зміни величини індуктивного зв'язку між ланцюгами, катушки роблять рухливими. Прилади, що служать для зміни взаємоіндукції між ланцюгами, називаються варіометра зв'язку.

Явище взаємоіндукції широко використовується для передачі енергії з одного електричного кола в інше, для перетворення напруги з допомогою трансформатора.

### Трансформатор.

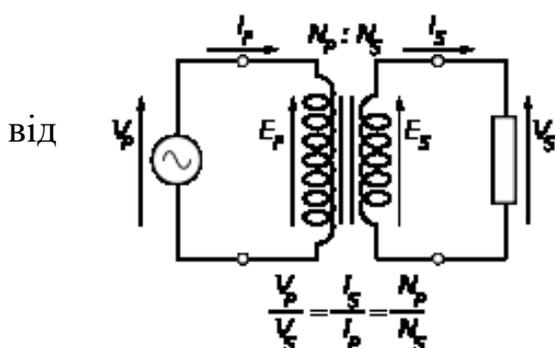
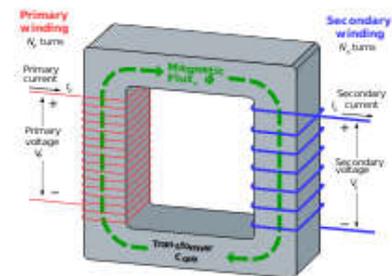
Трансформатор — пристрій, що використовується для зміни напруги й сили змінного струму.

Трансформатори широко застосовуються в лініях електропередач, в розподільних та побутових пристроях. Передача електроенергії відбувається з меншими втратами при високій напрузі й малій силі струму. Тому зазвичай лінії електропередач високовольтні. Водночас побутові й промислові машини вимагають високої сили струму й малої напруги, тому перед споживанням електроенергія перетворюється в низьковольтну.



Трансформатори характеризуються дуже високим коефіцієнтом корисної дії.

Трансформатор складається з обмоток на спільному осерді. Одна з обмоток під'єднана до джерела змінного струму. Ця обмотка називається первинною. Інша обмотка, вторинна, служить джерелом струму для навантаження. Створений струмом у первинній обмотці змінний магнітний потік викликає появу е.р.с. у вторинній обмотці,



оскільки обидві обмотки мають спільне осердя. Співвідношення е.р.с. у вторинній обмотці й напруги на первинній залежить кількості витків у обох обмотках. В ідеальному випадку

$$\frac{U_S}{U_P} = \frac{N_S}{N_P} = \frac{I_P}{I_S}$$

де індексом P позначені величини, що стосуються первинної обмотки, а індексом S — відповідні величини для вторинної обмотки, U — напруга, N — кількість витків, I — сила струму.

### Енергія магнітного поля.

Енергія магнітного поля в просторі задається формулою

$$W = \frac{1}{8\pi} \int \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} dV$$

Відповідно, густина енергії магнітного поля дорівнює

$$w = \frac{1}{8\pi} \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}$$

### Лекція 12. Змінний електричний струм. Конденсатор та котушка індуктивності в колі змінного електричного струму

План:

1. Визначення змінного струму Генератор змінного струму.
2. Активний опір в колі змінного струму.
3. Діюче значення сили струму і напруги. Потужність у колі змінного струму
4. Конденсатор в колі змінного електричного струму
5. Котушка індуктивності в колі змінного електричного струму
6. Закон Ома кола змінного струму.
7. Повний опір в колі змінного струму.

### Змінний електричний струм

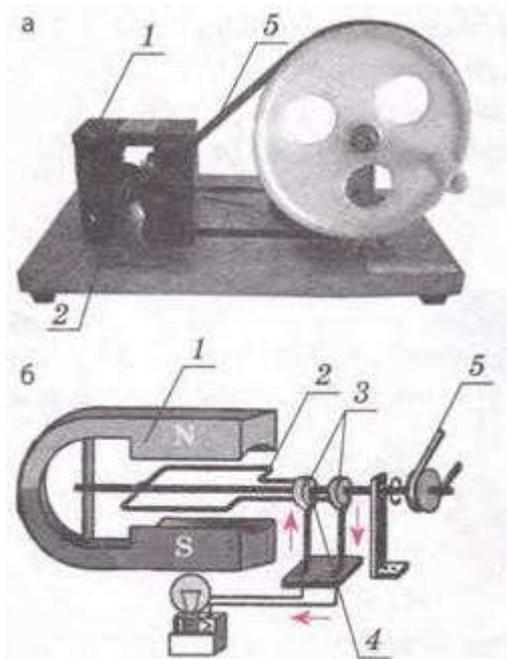
Змінний струм — електричний струм, що періодично змінюється за модулем і напрямком.

Вимушені електромагнітні коливання — незатухаючі коливання заряду, напруги, сили струму й інших фізичних величин, зумовлених ЕРС, що періодично змінюється:  $e = e_{\max} \sin \omega t$

Яскравим прикладом вимушених коливань є змінний струм:

$$I = I_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0)$$

Джерело електричної енергії, що створює періодично змінювану ЕРС, називають генератором змінного струму. Генератором змінного струму може служити дрютяна рамка, що обертається в однорідному магнітному полі індукцією  $\vec{B}$  з деякою постійною кутовою швидкістю  $\omega$ .



Зовнішній вигляд (а) і будова (б) найпростішого генератора змінного струму: 1 — постійний магніт (електромагніт), який слугує статором; 2 — обертова дротяна рамка, яка слугує ротором; 3 — кільця; 4 — щітки; 5 — ремінь приводу

Магнітний потік через рамку  $\Phi = BS \cos \alpha$ . Залежність  $\alpha$  кута від часу має вигляд  $\alpha = \omega t$ . Тоді  $\Phi = BS \cos \omega t$ . Зміна магнітного потоку призводить до виникнення в рамці ЕРС індукції  $\varepsilon_x$ . Відповідно до закону електромагнітної

$$\text{індукції } \varepsilon_x = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Швидкість зміни магнітного потоку  $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$  з погляду математики є похідною

функції  $\Phi(t)$ , тому  $\varepsilon_x = -\Phi'(t) = \omega BS \sin \omega t$ . Таким чином, розглянута рамка є

джерелом ЕРС, що зазнає гармонічних коливань амплітудою  $\varepsilon_{\max x} = \omega BS$ . Якщо

рамка містить  $N$  витків амплітуда ЕРС збільшується в  $N$  разів:  $\varepsilon_{\max x} = \omega NBS$

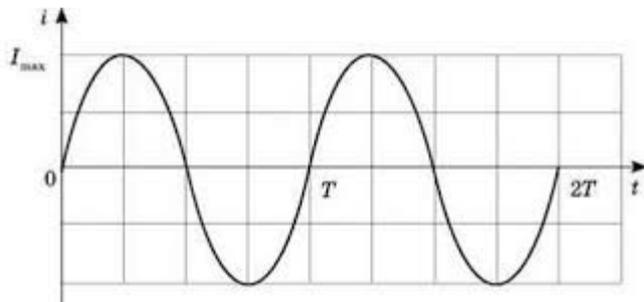
Щоб скористатися отриманою ЕРС, необхідно приєднати рухомі кінці рамки до нерухомих контактів зовнішнього електричного кола. Можна зробити так, щоб металеве кільце від кожного з кінців рамки сковзало по своєму нерухомому контакту (щітці). Тоді щітки можна розглядати як полюси джерела струму.

Якщо приєднати до цих полюсів резистор, опір  $R$  якого в багато разів перевищує опір рамки й контактів, напруга на ньому дорівнюватиме ЕРС у рамці  $u(t) = \omega NBS \sin \omega t$ , а сила струму в резисторі буде:

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} = \frac{\omega NBS}{R} \sin \omega t$$

На рисунку показаний графік залежності сили струму від часу

$$I_{\max} = \frac{\omega NBS}{R}$$



Якщо в колі активний опір то коливання сили струму і напруги відбуваються в одній фазі.

Період змінного струму:  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  частота:  $\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$ , А

Вивчаючи постійний струм, дізналися, що всі провідники мають електричний опір. Провідники чинять опір і при роботі змінного струму, однак у колах змінного струму існують різні види опорів: активні й реактивні опори.

Елемент електричного кола, у якому електрична енергія незворотно перетворюється у внутрішню енергію, називають **активним опором R**.

#### **Який опір називають активним.**

Вивчаючи постійний струм, ви дізналися, що всі провідники (за винятком надпровідників) мають електричний опір. Провідники чинять опір і змінному струму, однак у колах змінного струму, на відміну від постійного, існують різні види опорів, які відрізняються своєю фізичною природою. їх можна поділити на дві групи — активні і реактивні опори.

Елемент електричного кола має активний опір R, якщо під час проходження по ньому електричного струму частина електричної енергії перетворюється на внутрішню:

$$Q = I^2 R t.$$

#### **Діючі значення сили струму й напруги**

З поняттями миттєвого й амплітудного значення струму, напруги й ЕРС ми вже обізнані. Постає питання, яке значення сили струму або напруги прийняти для характеристики цього струму. Адже миттєве значення змінного струму увесь час змінюється, коливаючись між нулем і максимальним значенням. Можна було б схарактеризувати величину змінного струму його амплітудою. Це в принципі можливо, але практично дуже незручно, тому що складно побудувати такі прилади, які вимірювали б амплітуду змінного струму. Середнє значення сили струму за період дорівнює нулю й також не може служити його характеристикою. Справді, якщо увімкнути амперметр

постійного струму в коло змінного струму, то він покаже нуль. Зручно використовувати для характеристики змінного струму яку-небудь властивість, що не залежить від напрямку струму. Такою властивістю є, наприклад, теплова дія струму. Оскільки  $Q = I^2 R t$ , то вже середнє значення квадрата сили струму за період не дорівнює нулю.

Нехай сила струму змінюється за законом  $i(t) = I_{\max} \sin \omega t$  Тоді можна записати:  $i^2 = I_{\max}^2 \sin^2 \omega t$  з урахуванням  $\sin^2 \omega t = \frac{1 - \cos 2\omega t}{2}$

можна записати  $i^2 = \frac{I_{\max}^2}{2}(1 - \cos 2\omega t)$ . Середнє значення косинуса за період дорівнює нулю, отже  $i^2 = \frac{I_{\max}^2}{2}$ . Таким чином, у випадку синусоїдального струму діюче значення струму пов'язане з амплітудою в такий спосіб:  $I = \sqrt{i^2} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}$

Діюче значення сили змінного струму дорівнює силі такого постійного струму, що виділить у провіднику ту саму кількість теплоти, що й змінний струм за той самий час. Аналогічно:  $U = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}$ ;  $\varepsilon = \frac{\varepsilon_{\max}}{\sqrt{2}}$

Шкали вимірювальних приладів змінного струму градуують саме в діючих значеннях. У паспортах електротехнічних машин, апаратів і приладів змінного струму зазначені діючі значення сили струму й напруги.

На практиці для характеристики параметрів змінного струму використовують саме діючі значення сили струму й напруги. Наприклад, коли кажуть, що напруга в мережі змінного струму становить 220 В, а сила струму в колі 25 А, це означає, що діюче значення напруги в мережі 220 В, а діюче значення сили струму дорівнює 25 А. Амперметри і вольтметри змінного струму вимірюють саме діючі значення сили струму й напруги.

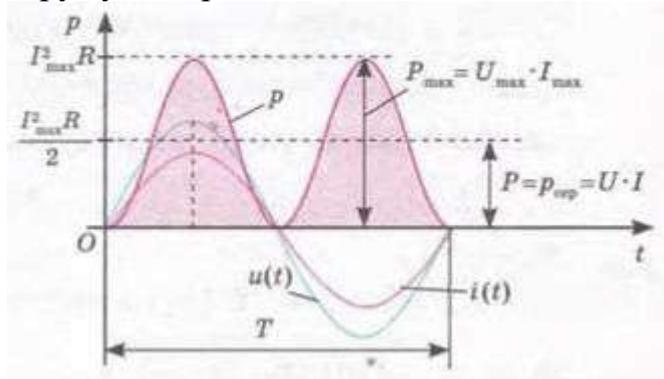


Рис. . Активний опір у колі змінного струму: графік залежності потужності (активної) від часу  $p(t)$

### Потужність у колі змінного струму

Потужність постійного струму можна обчислити за формулою:

$$P = I_0^2 R$$

Знайдемо середнє значення потужності змінного струму. На нескінченно малому проміжку часу силу струму можна вважати незмінною, тому миттєву потужність також можна обчислити за формулою:

$$P = I_0^2 R. \text{ Тоді } P = I_{\max}^2 R \sin^2 \omega t = I_{\max}^2 R \frac{1 - \cos 2\omega t}{2}.$$

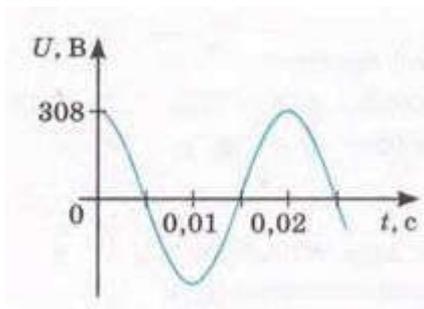
$$\text{Звідси: } P = P_{\max} = \frac{I_{\max}^2 R}{2}.$$

**Робота в колі змінного струму**  $A = I_0^2 R t$

В колі змінного струму втрата електричної енергії відбувається не тільки завдяки активному опору (тепловий хаотичний рух та взаємодія з протилежно зарядженими частинками), а завдяки реактивному опору. Щоб знати як зменшити втрату електричної енергії з причини реактивного опору необхідно визначити від чого він залежить.

### Конденсатор у колі змінног о струму

Знайдемо, як змінюється з часом сила струму в колі, що містить тільки конденсатор, якщо опором провідів і обкладок конденсаторів можна знехтувати. Напруга на конденсаторі  $U = \frac{q}{C}$  дорівнюватиме напрузі на кінцях кола.



Отже,  $\frac{q}{C} = U_{\max} \cos \omega t$  Заряд конденсатора змінюється за гармонічним законом:

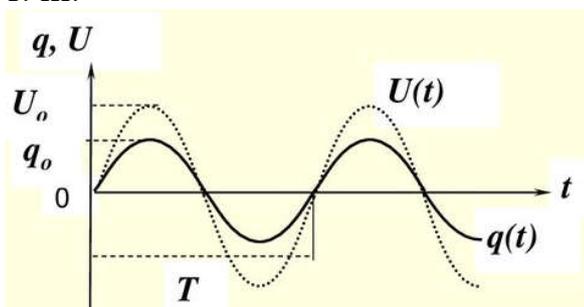
$$q = CU_{\max} \cos \omega t$$

Сила струму, що являє собою похідну заряду в часі, дорівнює:

$$i = q' = -U_{\max} C \sin \omega t = U_{\max} C \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad I = I_{\max} \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

де  $I_{\max} = \omega U_{\max} C$

Таким чином напруга на обкладках конденсатора й сила струму в коливальному контурі змінюються із частотою, причому колювання сили струму випереджають за фазою колювання напруги на  $\frac{\pi}{2}$ . Це означає, що в момент, коли конденсатор починає заряджатися, сила струму максимальна, а напруга дорівнює нулю. Після того як напруга досягає максимуму, сила струму стає рівною нулю й т. ін.



Для знаходження амплітуди колювань сили струму в контурі за відомою амплітудою колювань напруги на конденсаторі можна скористатися виразом, що збігається за формою із законом Ома для ділянки кола для постійного струму. Так, можна записати:

$$\frac{U_{\max}}{I_{\max}} = \frac{U_{\max}}{CU_{\max} \omega} = \frac{1}{\omega C}$$

Позначивши

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad \text{одержимо} \quad I = \frac{U}{X_c}$$

Величину  $X_c$  називають **ємнісним опором**. Оскільки  $\omega = 2\pi\nu$ , то

$$X_c = \frac{1}{2\pi\nu C}$$
 Звідси випливає, що постійний струм не може існувати в

колі, що містить конденсатор, тому що при  $\nu = 0$   $X_c \rightarrow \infty$

Очевидно, що з підвищенням частоти і ємності ємнісний опір зменшується.

Ємнісний опір  $X_c$  — це фізична величина, що характеризує здатність конденсатора протидіяти змінному струму. Середня потужність у розглянутому колі дорівнює нулю: коли конденсатор протягом чверті періоду заряджається, енергія його електричного поля збільшується, а протягом наступної чверті періоду електричне поле конденсатора зменшується, повертаючи всю отриману енергію назад у коло.

### **Котушка індуктивності в колі змінного струму**

Визначимо силу струму в колі, що містить котушку, активним опором якої можна знехтувати. Для цього попередньо знайдемо зв'язок між напругою на котушці й ЕРС самоіндукції в ній. Якщо електричний опір проводу котушки можна вважати нескінченно малим, то напругу на ній можна прийняти рівною за модулем й протилежною за знаком ЕРС самоіндукції котушки:

$$u = -e$$

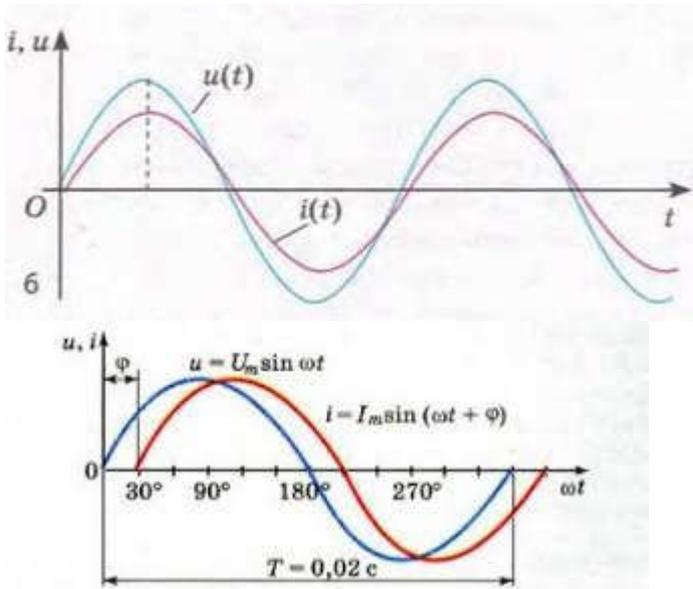
У разі зміни сили струму за гармонічним законом  $i = I_{\max} \sin \omega t$  ЕРС

самоіндукції дорівнює:  $e = -Li' = -L\omega I_{\max} \cos \omega t$ .

Напруга на кінцях котушки дорівнює:

$$u = L\omega I_{\max} \cos \omega t = L\omega I_{\max} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = u_{\max} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

де  $u = L\omega I_{\max}$  — амплітуда напруги. Отже, коливання напруги на котушці випереджають коливання сили струму на  $\frac{\pi}{2}$ . У момент, коли напруга на котушці досягає максимуму, сила струму дорівнює нулю. У момент, коли напруга стає рівною нулю, сила струму максимальна за модулем.



Відношення напруги на котушці до сили струму не є постійною величиною. Однак, як і у випадку з конденсатором, для знаходження амплітуди коливань сили струму в котушці можна скористатися виразом, що збігається за формою із законом Ома для ділянки кола постійного струму:

$$\frac{U_{\max}}{I_{\max}} = \frac{\omega L I_{\max}}{I_{\max} \omega} = \omega L$$

$$I_{\max} = \frac{U_{\max}}{\omega L} = \frac{U_{\max}}{X_L}$$

Позначивши  $X_L = \omega L$ , одержимо

Величину  $X_L$  — називають **індуктивним опором**. Індуктивний опір  $X_L = 2\pi\nu L$  залежить від частоти. Постійний струм взагалі «не помічає» індуктивності котушки. При  $\nu = 0$  індуктивний опір дорівнює нулю.

Чим швидше змінюється напруга, тим більше ЕРС самоіндукції й тим менше амплітуда сили струму.

**Індуктивний опір провідника  $X_L$  — це фізична величина, що характеризує опір провідника електричному струму, викликаний дією ЕРС самоіндукції:**

Середня потужність у розглянутому колі дорівнює нулю: коли сила струму протягом чверті періоду збільшується, енергія магнітного поля котушки збільшується, а протягом наступної чверті періоду магнітного поля котушки зменшується, повертаючи всю отриману енергію назад у коло. Таким чином, індуктивний опір (як і ємнісний) не сприяє необоротному перетворенню енергії електричного струму в інші форми енергії.

### Закон Ома для повного кола змінного струму

Розглянемо послідовну ділянку кола змінного струму для довільних значень  $R$ ,  $C$ ,  $L$  і частоти змінного струму.

**Повний опір  $Z$**  кола, що містить активний, індуктивний і ємнісний опір, обчислюють за формулою:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Різницю  $\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$  називають **реактивним опором**.

Якщо до кола змінного струму приєднана тільки котушка індуктивності з дуже малим активним опором, а ємність відсутня, то внаслідок дії вихрового електричного поля сила струму відстає за фазою від напруги на

$\frac{\pi}{2}$

Реактивний опір у колі змінного струму

Конденсатор і котушка індуктивності, введені в коло змінного струму, чинять додатковий опір струму. Цей опір називається реактивним, оскільки на його додання не витрачається енергія джерела. Чверть періоду котушка й конденсатор забирають енергію від джерела, наступну чверть періоду повертають енергію до джерела.

**Закон Ома для повного кола змінного струму** має вигляд:

$$I_{\max} = \frac{U_{\max}}{Z} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

Найменшого значення опору кола (тобто найбільшого амплітудного значення сили струму) можна досягти за умови, що  $X_L - X_C = 0$ . За дуже малих частот  $Z \sim X_C$  (головну роль відіграє ємнісний опір), а за дуже великих частот  $Z \sim X_L$  (головну роль відіграє індуктивний опір).

Різниця фаз між коливаннями напруги й сили струму залежить від частоти.

## **Модуль 6. Хвильові процеси. Геометрична та хвильова оптика**

### **Лекція №13. Хвильові процеси**

План

1. Поширення коливань в однорідному пружному середовищі.
2. Рівняння плоскої гармонійної хвилі.
3. Енергія хвилі. Вектор Умова
4. Інтерференція хвиль. Стоячі хвилі.
5. Геометрична оптика. Фотометрія
6. Закони віддзеркалення
7. Дослід Юнга. Інтерференція у тонкій плівці
8. Голографія. Дифракція

### **Коливання та їх характеристики.**

Коливаннями називаються рухи або процеси, які характеризуються певною повторюваністю в часі. Коливальні процес широкопоширені в природі і техніці, наприклад хитання маятника годин, змінний електричний струм і т.д. При коливальному рух маятника змінюється координата його центру мас, у випадку змінного струму коливаються напруга і струм в ланцюзі. Фізична природа коливань може бути різною, тому розрізняють коливання механічні, електромагнітні та інші. Однак різні коливальні процеси описуються однаковими характеристиками і однаковими рівняннями. Звідси впливає

доцільність єдиного підходу до вивчення коливань різної фізичної природи. Наприклад, єдиний підхід до вивчення механічних та електромагнітних коливань застосовувався англійським фізиком Д. У. Реле (1842-1919), а А.Г. Столетова, російським інженером-експериментатором П.М. Лебедевим (1866-1912). Великий внесок у розвиток теорії коливань внесли: Л.І. Мандельштам (1879-1944) його учні.

Коливання називаються вільними (або власними), якщо вони відбуваються зарахунок спочатку досконалої енергії при подальшому відсутності зовнішніх впливів на коливальну систему (систему, здійснюючу коливання).

Найпростішим типом коливань є гармонійні коливання - коливання, при яких коливається величина змінюється з часом за законом синуса (косінуса). Розгляд гармонійних коливань важливо з двох причин:

1. Коливання зустрічаються в природі і техніці, часто мають характер, близький до гармонійному;

2. Різні періодичні процеси (процеси, що повторюються через рівні проміжки часу) можна уявити як накладення гармонійних коливань.

Гармонійні коливання величини  $s$  описуються рівнянням типу

$$s = A \cos(\omega t + \varphi),$$

(1) де  $A$  - максимальне значення коливається величини, що називається амплітудою коливання,  $\omega$  ( $\omega = 2\pi n$ ) - кругова (циклічна) частота,  $\varphi$  - початкова фаза коливання в момент часу  $t = 0$ ,  $\omega t + \varphi$  - фаза коливання в момент часу  $t$ .

Фаза коливання визначає значення коливається величини в даний момент часу. Так як косинус змінюється в межах від 1 до -1, то  $s$  може приймати значення від  $+A$  до  $-A$ .

Коливання — фізичний процес, під час якого чергуються інтервали збільшення й зменшення фізичної величини.

Коливання можуть мати найрізноманітнішу природу, наприклад, механічні коливання тіл, коливання тиску й температури, сили струму, напруги тощо.

Коливання називаються періодичними, якщо фізичний стан системи повністю повторюється через якийсь певний проміжок часу, що називається періодом.

Коливання, для яких залежність змінної від часу описується синусоподібною кривою, називаються гармонічними. Періодичні коливання із іншою залежністю від часу називаються ангармонічними.

Коливання, які виникають при відхиленні стану фізичної системи від рівноважного, називають власними коливаннями. Коливання, які виникають внаслідок дії зовнішньої періодичної сили, називають вимушеними коливаннями.

Якщо відхилення фізичної величини від середнього положення в процесі коливань зменшуються в часі, говорять про затухання коливань, а якщо збільшуються — про наростання коливань.

Затухаючі коливання-коливання які, поступово слабнучи, зникають. Амплітуда затухаючих гармонічних коливань зменшується, а частота залишається незмінною.

В більшості фізичних систем коливання виникають при виведенні системи з положення рівноваги. Такі коливання здебільшого розсіюють енергію й затухають з часом. Однак у відкритих дисипативних системах із сталим притоком енергії можуть виникнути коливання, які не затухають, доки не припиниться приплив енергії. Такі коливання називають автоколиваннями.

### Додавання коливань.

Додавання декількох гармонійних коливань одного напрямку й однакової частоти стає наочним, якщо коливання зображати графічно у вигляді векторів на площині. Отримана таким способом схема називається векторною діаграмою.

Візьмемо ось, уздовж якої будемо відкладати коливається величину  $x$ . З взятої на осі точки  $P$  відкладемо вектор довжини  $A$ , який утворює з віссю кут  $\varphi$ . Якщо привести цей вектор в обертання з кутовою швидкістю  $\omega$ , то проекція кінця вектора буде переміщатися по осі  $x$  в межах від  $-A$  до  $+A$ , причому координат проекції буде змінюватися з часом за законом

Отже, проекція кінця вектора на вісь буде здійснювати гармонічні коливання з амплітудою, що дорівнює довжині вектора, з круговою частотою, що дорівнює кутової швидкості обертання вектора, і з початковою фазою, що дорівнює куту, утвореному вектором з віссю в початковий момент часу.

Таким чином, гармонійне коливання може бути задано за допомогою вектора, довжина якого дорівнює амплітуді коливання, а напрямок утворює з віссю  $x$  кут, що дорівнює початковій фазі коливань.

Розглянемо складання двох гармонічних коливань одного напрямку й однакової частоти. Результуюче коливання буде сумою коливань  $x_1$  і  $x_2$ , які визначаються функціями.

Уявімо обидва коливання за допомогою векторів  $A_1$  і  $A_2$ . Побудуємо за правилами додавання векторів результуючий вектор  $A$ . На малюнку видно, що проекція цього вектора на вісь  $x$  дорівнює сумі проекцій складовими векторів.

Тому, вектор  $A$  являє собою результуюче коливання. Цей вектор обертається з тією ж кутовою швидкістю  $\omega$ , як і вектори  $A_1$  і  $A_2$ , так що сума  $x_1$  та  $x_2$  є гармонійним коливанням з частотою  $\omega$ , амплітудою  $A$  і початковою фазою  $\varphi$ .

Представлення гармонійних коливань за допомогою векторів дозволяє замінити додавання функцій складанням векторів, що значно простіше.

Додавання коливань у взаємно перпендикулярних напрямках.

Уявімо дві взаємно перпендикулярні векторні величини  $x$  та  $y$ , що змінюються з часом з однаковою частотою  $\omega$  по гармонійному закону.

Де  $e_x$  і  $e_y$  - орт координатних осей  $x$  і  $y$ ,  $A$  і  $B$  - амплітуди коливань. Величинами  $x$  та  $y$  може бути, наприклад, зміщення матеріальної точки (частки) з положення рівноваги.

Частка буде рухатися за деякою траєкторією, вигляд якої залежить від різниці фаз обох коливань. Вирази є заданий в параметричній формі рівняння цієї траєкторії. Щоб отримати рівняння траєкторії в звичайному вигляді, потрібно виключити з рівнянь параметр  $t$ .

Розгорнемо косинус за формулою для косінуса суми:

Підставимо замість  $\cos$ ? Т і  $\sin$ ?

Це рівняння еліпса, осі якого повернуті відносно координатних осей  $x$  та  $y$ . Орієнтація еліпса і його півосі залежать досить складним чином від амплітуд  $A$  і  $B$  і різниці фаз?

Спробуємо знайти форму траєкторії для кількох окремих випадків.

1. Різниця фаз? дорівнює нулю.

Звідси виходить рівняння прямої:

Результуюче рух є гармонійним коливанням вздовж цієї прямої з частотою? і амплітудою, що дорівнює (рис. 1 а).

2. Різниця фаз? дорівнює  $\pm\pi$ .

Отже, результуюче рух являє собою гармонійне коливання вздовж прямої.

### Електромагнітні хвилі та їх властивості.

Електромагнітна хвиля це процес розповсюдження електромагнітної взаємодії в просторі.

Електромагнітні хвилі описуються загальними для електромагнітних явищ рівняннями Максвелла.

У вакуумі електромагнітна хвиля розповсюджується із швидкістю, яка називається швидкістю світла. Швидкість світла є фундаментальною фізичною константою, яка позначається латинською літерою  $c$ . Згідно із основним постулатом теорії відносності швидкість світла є максимально можливою швидкістю передачі інформації чи руху тіла. Ця швидкість складає 299 792 458 м/с. (1667р. датський астроном Ремер розрахував швидкість світла).

Електромагнітна хвиля характеризується частотою. Розрізняють лінійну частоту  $\nu$  й циклічну частоту  $\omega = 2\pi\nu$ . В залежності від частоти електромагнітні хвилі належать до одного із спектральних діапазонів.

Іншою характеристикою електромагнітної хвилі є хвильовий вектор  $\vec{k}$ . Хвильовий вектор визначає напрямок розповсюдження електромагнітної хвилі, а також її довжину. Абсолютне значення хвильового вектора називають хвильовим числом.

Довжина хвилі — характеристика плоскої періодичної хвилі, що позначає найменшу відстань між точками простору, в яких хвиля має однакову фазу.

Довжина хвилі зазвичай позначається грецькою літерою  $\lambda$ . Із довжиною хвилі однозначно зв'язана така характеристика, як хвильове число  $k$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Довжина хвилі залежить від частоти. Ця залежність називається законом дисперсії. Часто

залежність між частотою і довжиною хвилі обернено-пропорційна. У таких випадках швидкість розповсюдження хвилі фіксована й не залежить від частоти. Наприклад, для електромагнітної хвилі у вакуумі

$$\nu = \frac{c}{\lambda},$$

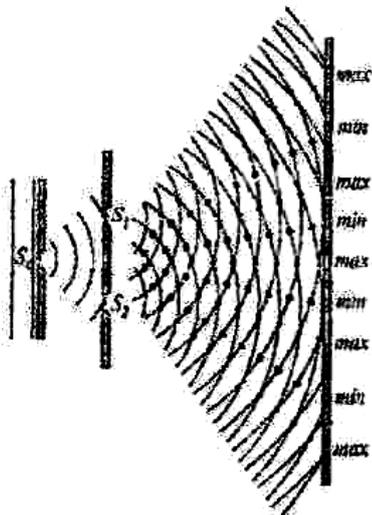
де  $\nu$  — лінійна частота, а  $c$  — швидкість світла.

При переході хвилі з одного середовища в інше довжина хвилі змінюється, на відміну від частоти, яка залишається сталою. Електромагнітні хвилі в середовищі зазвичай характеризуються приведеною довжиною хвилі, тобто довжиною, яку хвиля мала б у вакуумі.

**Інтерференція** — накладання хвиль, при якому в різних точках спостерігається посилення (конструктивна інтерференція) або послаблення амплітуди коливань. Результат накладання хвиль називається інтерференційною картиною.

Інтерференція спостерігається у когерентних хвиль. **Когерентні хвилі це хвилі, що розповсюджуються в просторі з однаковою частотою і постійною різницею фаз.**

$$X = X_m \sin \omega t + \varphi_0$$



При інтерференції результуюче коливання є геометричною сумою коливань обох хвиль у відповідних точках. Найпростішим випадком інтерференції є накладання двох гармонічних хвиль з однаковою частотою і поляризацією.

Явище інтерференції використовується, наприклад, в радіотехніці і акустиці для створення складних антен. Особливо велике значення інтерференція має в оптиці, вона лежить в основі оптичної та акустичної голографії

*Інтерференцією* хвиль називається явище підсилення коливань в одних точках простору та ослаблення а інших у результаті додавання двох або більше когерентних хвиль, які надходять у ці точки.

### **Когерентність хвиль.**

Інтерференція – загальна властивість хвиль будь-якої природи. Стійка в часі інтерференційна картина може спостерігатися тільки у разі додавання когерентних коливань.

*Когерентні (зв'язані) хвилі* – це хвилі, що мають однакову частоту та незмінний зсув фаз у кожній точці простору.

*Когерентні джерела* – це джерела, що мають однакову частоту та незмінний зсув фаз у часі.

Незважаючи на те що умова когерентності залишається однаковою для і хвиль різної фізичної природи, способи здійснення когерентності, наприклад, для джерел звуку та джерел світла, були зовсім різними. Для одержання когерентних звукових хвиль можна скористатися двома незалежними джерелами звуку, що здійснюють коливання зі сталою різницею фаз. Незалежні ж джерела світла (крім оптичних квантових генераторів) не дають когерентних хвиль.

Причина полягає в тому, що атоми джерел випромінюють світло незалежно один від одного окремими «обривками» (цугами) синусоїдальних хвиль. І такі цуги хвиль від обох джерел накладаються один на одного. У результаті амплітуда коливань у будь-якій точці простору хаотично змінюється з часом. Отже, ці цуги некогерентні. Ніякої стійкої картини з певним розподілом максимумів і мінімумів освітленості не спостерігається.

**Шкала електромагнітних хвиль** – неперервна послідовність частот і довжин хвиль електромагнітних випромінювань.



Прийнято виділяти низькочастотне радіо- та  $\gamma$ -випромінювання, інфрачервоні, ультрафіолетові та рентгенівські промені, видиме світло.

Принципової різниці між цими видами випромінювання немає. Всі вони являють собою електромагнітні хвилі, збуджувані зарядженими частинками. Випромінювання різної довжини хвилі відрізняються одне від одного за способами їх одержання і методами реєстрації.

На з'ясування природи світла знадобилося не одне тисячоліття. За цей час багато різних гіпотез змінили одна одну. Оптика (від грец. **optike** – наука про зорові сприйняття) спочатку розглядалася як наука про зір.

*Оптика* являє собою розділ фізики, в якому вивчаються явища та закономірності, пов'язані з виникненням, поширенням і взаємодією з речовиною електромагнітних хвиль видимого діапазону.

### Корпускулярна теорія світла Ньютона.

Першою науковою теорією, яка намагалася пояснити фізичну природу світла, стала теорія світлових частинок, розроблена **І. Ньютоном** (1643 – 1727) і викладена ним у книзі «Оптика». Відповідно до її положень, світло являє собою потік частинок, які випускаються світним тілом у всіх напрямках (перенесення речовини). Виходячи з корпускулярних уявлень Ньютон пояснив більшість відомих тоді оптичних явищ: прямолінійне поширення світла в однорідному середовищі, відбивання та заломлення світла.

### Хвильова теорія Гюйгенса.

Відповідно до теорії **Х. Гюйгенса** (1643 – 1695) світло – це хвилі, що поширюються в особливому, гіпотетичному середовищі – ефірі, який заповнює весь простір і проникає усередину всіх тіл. Гюйгенс не розглядав справжнього хвильового процесу, його міркування стосувалися лише поширення хвильового

фронту. Він суто математично описав явище відбивання й заломлення хвиль і показав, що швидкість світла в більш густому середовищі має бути меншою, ніж у повітрі. У 1801 році **Т. Юнг** (1773 – 1829) на підставі хвильових уявлень дуже просто й наочно роз'яснив інтерференцію світла та розвинув, таким чином, хвильову теорію світла. У 1818 році **О. Френель** (1788 – 1827) незалежно від Юнга вивів докладну теорію дифракції й інтерференції світла, показавши, що інтерференція є прямим наслідком хвильової природи світла. Остаточний удар по корпускулярній теорії був нанесений дослідями **Ж. Фуко**. Він виміряв швидкість світла у воді й показав, що її значення збігається з теоретично здобутим у хвильовій теорії. Хвильова теорія з єдиної точки зору пояснила усі відомі тоді явища й передбачила низку нових. Понад сто років корпускулярна й хвильова гіпотези про природу світла існували паралельно. Жодна з них не могла здобути вирішальної перемоги. Лише авторитет І. Ньютона змушував більшість учених віддавати перевагу корпускулярній теорії.

#### **Електромагнітна теорія світла.**

У другій половині XIX століття **Дж. Максвелл** (1831 – 1879) довів, що світло являє собою окремий вид електромагнітних хвиль. Його роботи заклали підґрунтя електромагнітної теорії світла. Після експериментального виявлення електромагнітних хвиль **Г. Герцем** не залишилося ніяких сумнівів у тому, що під час поширення світло «поводиться» як хвиля. У 1899 році **П. М. Лебедев** навів новий доказ тотожності світлових і електромагнітних хвиль. Він виявив дослідним шляхом, що світло тисне на тіла, на які падає, й виміряв цей тиск. За теорією Максвелла електромагнітні хвилі також чинять подібний тиск. Таким чином, у другій половині XIX століття була заснована електромагнітна теорія світла.

#### **Квантова теорія світла.**

У 1900 році німецький фізик **М. Планк** припустив, що атоми тіл поглинають і випромінюють енергію скінченими порціями – квантами. У 1905 році **А. Ейнштейн** (1879 – 1955) припустив, що світло поширюється в просторі у вигляді дискретних об'єктів – квантів світла. Таким чином, були виявлені квантові властивості світла.

#### **Корпускулярно-хвильовий дуалізм.**

Виникла надзвичайна ситуація: явища інтерференції та дифракції, як і раніше, можна було пояснити, вважаючи світло хвилею, а явища випромінювання й поглинання – вважаючи світло потоком частинок. Досліди **О. Г. Столетова** (1839 - 1896) з фотоефекту також показали, що світло поводить себе як потік частинок. У результаті численних обговорень, пошуків і досліджень виникла сучасна теорія світла, що є синтезом корпускулярної та хвильової теорій. В основі цієї теорії лежить думка, що світло одночасно має і хвильові, й корпускулярні властивості.

*Геометричною оптикою* називається розділ оптики, в якому вивчаються закони поширення світлової енергії в прозорих середовищах на основі уявлення про світловий промінь.

Геометрична оптика базується на трьох законах:

- закон прямолінійного поширення світла;

- закон відбивання світла;
- закон заломлення світла.

Основними поняттями геометричної оптики є *пучок* і *промінь*.

У першому наближенні *пучок* променів – це сукупність світлових променів.

У сучасній фізиці під *світловим променем* розуміють достатньо вузький пучок світла, який у межах зони, в якій вивчається його поширення, можна вважати не розбіжним.

Оскільки світло, як і будь-яке випромінювання, переносить енергію, то можна говорити, що світловий промінь указує напрям перенесення енергії світловим пучком.

### Закон прямолінійного поширення світла.

**!!** Світло в оптично однорідному середовищі поширюється прямолінійно.

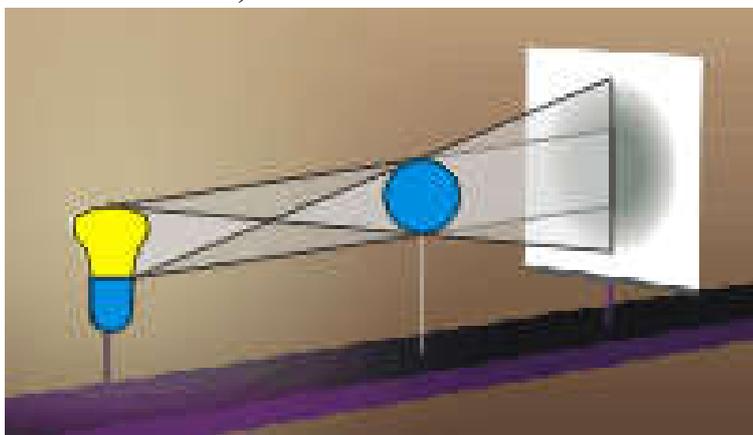
Оптично однорідним вважається таке середовище, в якому світло поширюється зі сталою швидкістю. Якщо є два середовища, в яких світло поширюється з різними швидкостями, то середовище, де світло поширюється з меншою швидкістю, називають оптично більш густим, а середовище, де світло поширюється з більшою швидкістю, – оптично менш густим.

**??** Наведіть приклади явищ, які підтверджують цей закон.

*Тінь* – область простору, до якої не потрапляє енергія від джерела світла (або інакше: область простору, з якої не можна побачити джерело світла).

Якщо джерело світла протягне, то на екрані навколо тіні утвориться півтінь.

*Півтінь* – область простору, до якої енергія від джерела світла потрапляє частково (або інакше: область простору, з якої джерело світла можна побачити лише частково).



Мал.1 Утворення тіні та півтіні

Утворенням тіні й півтіні пояснюються *сонячні й місячні затемнення*.

**??** Поясніть ці явища з точки зору геометричної оптики.

Пояснення: Під час *сонячного затемнення* повна тінь від Місяця падає на Землю. З цього місця земної поверхні Сонця не видно. Коли Місяць, обертаючись навколо Землі, потрапляє в її тінь, то спостерігається *місячне затемнення*.

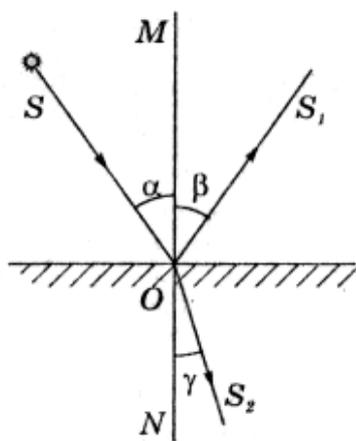
У тих місцях планети, куди впала тінь, буде спостерігатися повне сонячне затемнення. У місцях півтіні тільки частина Сонця буде закрита Місяцем, тобто відбудеться його часткове затемнення.

В залежності від форми поверхні, на яку падає світло, відбивання буває: дзеркальним (мал. а.) та дифузним (мал.б):



### Закон відбивання світла.

З відбиванням світла ми стикаємося щодня: день у день кожний із нас дивиться на себе в дзеркало; ми бачимо на спокійній поверхні води зображення Сонця й Місяця, дерев і хмар. Це приклади дзеркального відбиття світла.



Під час поділу світлового пучка виконується закон збереження енергії.

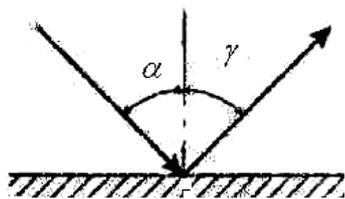
Нехай світловий промінь падає на межу розділу двох середовищ. Лінія MN – перпендикуляр до межі поділу двох середовищ. Промінь SO – падаючий; промінь OS<sub>1</sub> – відбитий; промінь OS<sub>2</sub> – заломлений. Кутом падіння ( $\alpha$ ) називається кут між падаючим променем і перпендикуляром, опущеним у точку падіння. Кутом відбивання ( $\beta$ ) називається кут між відбитим променем і тим самим перпендикуляром. Кутом заломлення ( $\gamma$ ) називається кут між заломленим променем і

перпендикуляром MN.

Закон відбивання світла, як і закон прямолінійного поширення світла, відкритий давньогрецьким ученим Евклідом.

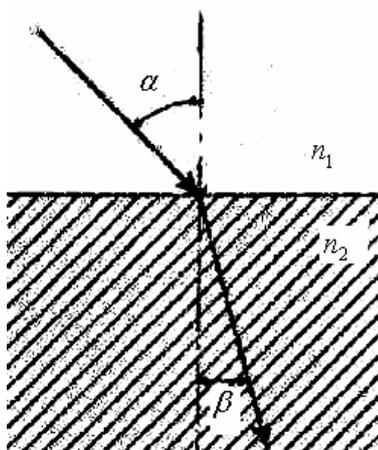
Геометрична оптика — розділ оптики, в якому вивчаються закони поширення світлових променів.

**Закони геометричної оптики – це закони, які встановлюють правила геометричного розповсюдження світлових променів в середовищі.**



**Закон відбиття** Падаючий промінь електромагнітної хвилі, відбитий промінь і перпендикуляр в точку падіння лежать в одній площині, кут падіння дорівнює куту відбиття. Промінь електромагнітної хвилі – це направлений відрізок вздовж якого розповсюджуються електромагнітні хвилі.

$$\angle \alpha = \angle \gamma$$



**Закон заломлення** Падаючий промінь, заломлений промінь електромагнітної хвилі і перпендикуляр в точці падіння лежать в одній площині.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}, \quad n_2 > n_1$$

$n_2, n_1$  – абсолютні показники заломлення середовища, які показують у скільки разів швидкість

розповсюдження електромагнітних хвиль в середовищі зменшується відносно вакууму.

$$n_1 = \frac{V_{e/\text{вакуум}}}{V_{e/\text{середовище}}}; \quad \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}.$$

Основоположниками хвильової природи світла були Гюйгенс, Френель. Після відкриття Майкельсоном швидкості електромагнітної хвилі та дослідів по інтерференції та дифракції було зроблено висновок, що світло – це електромагнітна хвиля то для виконуються закони відбиття та заломлення, явища інтерференції та дифракції.

**Інтерференція.** Інтерференція — накладання хвиль, при якому в різних точках спостерігається посилення (конструктивна інтерференція) або послаблення амплітуди коливань. Результат накладання хвиль називається інтерференційною картиною.

Особливо велике значення інтерференція має в оптиці, вона лежить в основі оптичної та акустичної голографії.

*Інтерференцією* хвиль називається явище підсилення коливань в одних точках простору та ослаблення а інших у результаті додавання двох або більше когерентних хвиль, які надходять у ці точки.

### Когерентність хвиль.

Інтерференція – загальна властивість хвиль будь-якої природи. Стійка в часі інтерференційна картина може спостерігатися тільки у разі додавання когерентних коливань.

*Когерентні* (зв'язані) *хвилі* – це хвилі, що мають однакову частоту та незмінний зсув фаз у кожній точці простору.

*Когерентні джерела* – це джерела, що мають однакову частоту та незмінний зсув фаз у часі.

Незалежні ж джерела світла (крім оптичних квантових генераторів) не дають когерентних хвиль. Причина полягає в тому, що атоми джерел випромінюють світло незалежно один від одного окремими «обривками» (цугами) синусоїдальних хвиль. І такі цуги хвиль від обох джерел накладаються один на одного. У результаті амплітуда коливань у будь-якій точці простору хаотично змінюється з часом. Отже, ці цуги некогерентні. Ніякої стійкої картини з певним розподілом максимумів і мінімумів освітленості не спостерігається.

### Інтерференційний експеримент Юнга

Інтерференційний дослід Юнга або Інтерферометр на подвійних щілинах - оптичний прилад, запропонований в 1802 році Томасом Юнгом для спостереження явища інтерференції когерентних світлових хвиль. Цей експеримент зіграв головну роль в прийнятті хвильової теорії світла. На думку самого Юнга, цей експеримент був найвищим досягненням його життя.

Цей прилад складається з двох вузьких щілин S1 та S2, які виконують роль двох когерентних джерел світла. Справа в тому, що через них проникають два когерентні промені світла від основного джерела світла S. Відстань між щілинами

дорівнює  $d$ . Віссю інтерференційної схеми Юнга є лінія, проведена від основного джерела світла через середину відстані між щілинами. База інтерферометра  $L$  - це відстань від площини щілин до площини інтерференційного поля екрану. На екрані виникає інтерференційна картина у вигляді паралельних до щілини еквідистантних світлих та темних смуг. За шириною інтерференційної смуги можна визначити довжину хвилі світла.

### Принцип Гюйгенса.

Геометричне місце точок середовища, що коливаються в одній фазі, називається *хвильовою поверхнею*.

Передня хвильова поверхня, охоплюючи точки, які щойно дістали початковий імпульс, переміщається в просторі. Це *фронт хвилі*.

Наприклад, фронт хвилі, який збуджується одиночним вібратором невеликих розмірів, має форму кола.

Напрямок поширення хвилі завжди перпендикулярний до її фронту. Цей напрям називається *променем*. Він указує напрям енергії, що переноситься хвилею.

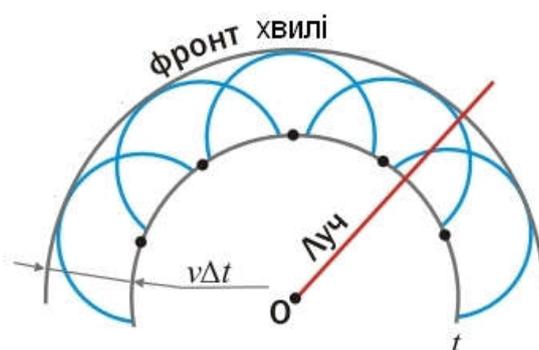
Голландський фізик Х. Гюйгенс знайшов простий геометричний спосіб знаходження фронту хвилі в момент часу  $t = \Delta t$ , якщо відомо його положення в момент  $t$ .

**Принцип Гюйгенса:** *кожна точка фронту хвилі може розглядатися як джерело вторинних хвиль*. Нове положення фронту хвилі зображається як обвідна цих вторинних хвиль.

Швидкість світла у вакуумі. Методи вимірювання швидкості світла.

У фізиці швидкість світла є однією з фундаментальних констант. Жодна константа не набула такого важливого значення, як швидкість світла: як параметр вона входить у численні рівняння теоретичної фізики, її значення використовується в радіолокації, при вимірюванні відстаней від Землі до інших планет, під час керування космічними польотами. Виразити швидкість світла через інші сталі неможливо, її можна тільки виміряти дослідним шляхом.

Швидкість світла є скінченною, граничною та інваріантною щодо різних інерціальних систем відліку.

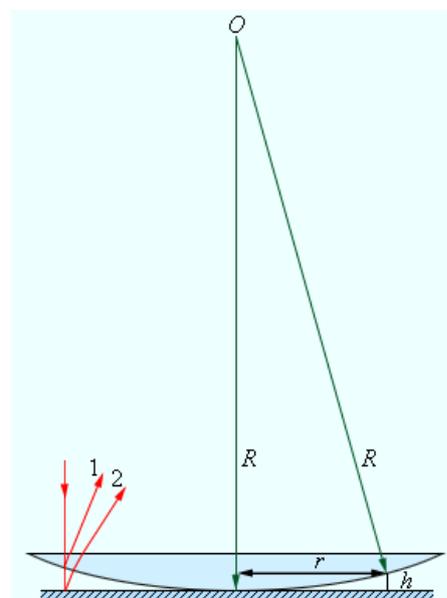


### Інтерференція світла.

Для одержання двох когерентних світлових хвиль можна випромінювання від одного й того самого атома розділити шляхом відбивання або заломлення на два пучки.

Кільця Ньютона.

Когерентність хвиль, відбитих від зовнішньої та внутрішньої поверхонь плівки, пояснюється їх



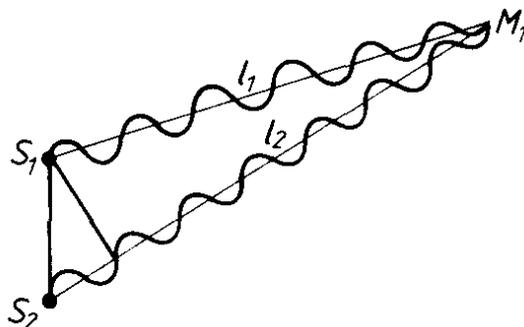
належністю до одного й того самого світлового пучка.

Якщо джерела когерентні та синфазні (тобто збігаються за фазою в часі), то в точках середовища, куди хвилі надходять, збігаючись за фазою, утвориться максимум інтерференційної картини.

### Максимуми та мінімуми інтерференції

Умова максимуму: амплітуда коливань середовища в даній точці максимальна, якщо різниця ходу двох хвиль, які збуджують коливання в цій точці, дорівнює цілому числу довжин хвиль:  $\Delta d = k\lambda$ , де  $\Delta d$  – різниця ходу двох хвиль, а  $k = 0, 1, 2, \dots$ .

Умова мінімуму: амплітуда коливань середовища в даній точці мінімальна, якщо різниця ходу двох хвиль, які збуджують



коливання в цій точці, дорівнює непарному числу півхвиль:  $\Delta d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ .

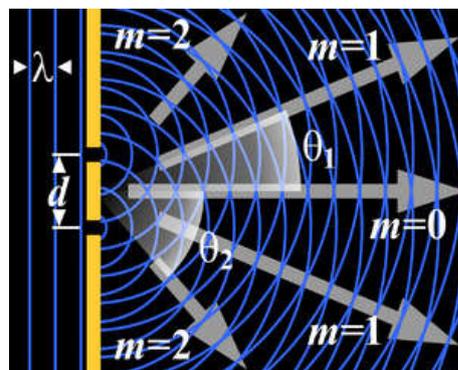
### Технічне застосування інтерференції.

Явище інтерференції світла знаходить різноманітне практичне застосування. Використовуючи це явище, можна дуже точно визначати довжини світлових хвиль, вимірювати показники заломлення газів та інших речовин, здійснювати точні вимірювання лінійних розмірів, контролювати якість шліфування й полірування поверхонь та ін.

### Дифракція

**Дифракція** - явище, що виникає при поширенні хвиль (наприклад, світлових і звукових хвиль). Суть цього явища полягає в тому, що хвиля здатна обгинати перешкоди.

Це зумовлює те, що хвильовий рух спостерігається в області за перешкодою, куди хвиля не може потрапити прямо. Дифракція добре проявляється тоді, коли розмір перешкоди на шляху хвилі порівняний з її довжиною або менший.



Якщо довжина хвилі більша чим довжина перешкоди, то хвиля проходить її незмінюючи свої параметри.  $\lambda > l$ .

Якщо довжина хвилі менша чим довжина перешкоди  $\lambda < l$ . то хвиля огинає перешкоду і за перешкодою створюється простір в якому неможливо прийняти електромагнітну хвилю.

Явище дифракції світла наглядно підтверджує теорію корпускулярно-хвильової природи світла.

### Дифракція світла. Експеримент Томаса Юнга

Розглядаючи хвилі на поверхні води від двох кинутих каменів, можна помітити, як, накладаючись один на одного, хвилі можуть інтерферувати, тобто

гасити або підсилювати одна одну. Ґрунтуючись на цьому, анґлійський фізик і лікар Томас Юнг поставив в 1801 році досліди з променем світла, який проходив через два отвори в непрозорому екрані, утворюючи, таким чином, два незалежних джерела світла, аналогічних двом кинутим у воду каменям. У результаті він спостерігав інтерференційну картину, що складається з темних і білих смуг, яка не могла б утворитися, якби світло складалося з корпускул. Темні смуги відповідали зонам, де світлові хвилі від двох щілин гасять один одну. Світлі смуги виникали там, де світлові хвилі підсилювалися. Таким чином, було доведено хвильову природу світла.

**Дифракція** – це явище огинання світлом меж непрозорих тіл: країв отворів, вузьких щілин й екранів, тобто порушення прямолінійності світла.

Пропускаючи тонкий пучок світла крізь маленький отвір, можна спостерігати порушення закону прямолінійного поширення світла. Досліди Т.Юнга, дослідження О.Френеля, принцип Х.Гюйгенса дали пояснення прямолінійному поширенню світла в однорідному середовищі на основі хвильової теорії.

Відповідно до ідеї Френеля хвильова поверхня в будь-який момент часу являє собою не просто обвідну вторинних хвиль, а результат їхньої інтерференції.

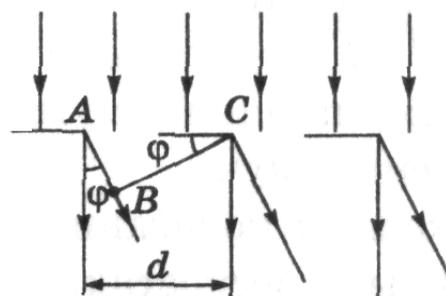
Дифракція світла визначає межі застосовності геометричної оптики. Виявляється, закон прямолінійного поширення світла й інші закони геометричної оптики виконуються досить точно лише в тому випадку, коли розміри перешкод на шляху поширення світла набагато більші за довжину світлової хвилі. Огинання світлом перешкод обмежує розділювальну здатність найважливіших оптичних інструментів – телескопа й мікроскопа.

### Дифракційна решітка.

**Дифракційна решітка** – скляна тонка пластинка, на яку нанесено паралельні штрихи з проміжками між ними. Ширина щілини й штриха позначається  $d$  і називається **сталюю решітки** (або **періодом решітки**).

Дифракційна решітка служить для розкладання світла в спектр і вимірювання довжини хвилі. Якщо на дифракційну решітку падає плоска монохроматична хвиля довжиною  $\lambda$ , то відповідно до принципу Гюйгенса – Френеля кожен точку фронту хвилі можна прийняти за джерело вторинних хвиль, які поширюються в усі боки.

Нехай вторинні хвилі, що йдуть під кутом  $\varphi$ , в результаті інтерференції підсилюються. Тобто для них виконується умова максимуму:  $\Delta d = k\lambda$ , де  $\Delta d$  – різниця ходу двох хвиль, а  $k = 0, 1, 2, \dots$  – порядок спектру. З трикутника ABC:  $AB = \Delta d = d \cdot \sin \varphi$ . Таким чином, **рівняння дифракційної решітки** матиме вигляд:  $d \cdot \sin \varphi = k\lambda$ .



Звідси випливає, що положення максимумів світла залежить не від числа щілин, а тільки від довжини хвилі. Чим менша довжина хвилі випромінювання, тим меншому значенню кута відповідає положення максимуму. Таким чином, видиме оптичне

випромінювання розтягується в спектр так, що внутрішнім краєм його є фіолетове оптичне випромінювання, а зовнішнім – червоне.



### Дисперсія.

**Дисперсія світла – це процес розкладання світла білого кольору на спектри при проходженні через скляну призму.**

Дисперсія світла — залежність показника заломлення (або діелектричної проникності) середовища від частоти хвилі світла.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Із закону заломлення видно, чим більша довжина хвилі тим більше кут заломлення. Так як кожен колір має свою довжину хвилі, то при проходженні через призму він заломлюється під своїм кутом, що і приводить до створення спектру.

## Модуль 7. Квантові властивості світла.

### Лекція №14. Фотоелектричний ефект Зовнішній та внутрішній фотоелектричний ефект

План

1. Предмет, методи і завдання квантової фізики
2. Закони фотоелектричного ефекту. Дослідження Столетова
3. Квантова теорія фотоелектричного ефекту
4. Фотоелементи та їх застосування
5. Зовнішній фотоелектричний ефект
6. Внутрішній фотоелектричний ефект
7. Фотогальванічний ефект

### Квантова оптика

Квантова оптика розглядає оптичні явища, в яких вивчається квантова природа світла. Основні ідеї квантової теорії були розроблені в період з 1900 до 1930 рр. Згідно з гіпотезою М. Планка, енергія випромінюється не безперервно, а дискретно, тобто певними порціями квантами (фотонами).

Квантова природа світла визначає, що світло – це потік фотонів (квантів) кожен фотон має масу, імпульс і дискретну енергію тільки при швидкості світла.

### Гіпотеза Планка.

В 1900 році М. Планк висунув теорію про квантовий характер випромінюваної енергії: енергія випромінювання складається з окремих малих і неподільних частин – квантів. Енергія такого кванта визначалася величиною  $E = h \cdot \nu$ , де  $h$  – стала Планка.

За сучасними даними  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с .

Гіпотеза Планка отримала подальший розвиток в роботах Ейнштейна. Електромагнітна хвиля не тільки випромінюється, але і поширюється і поглинається у вигляді потоку квантів. Квант світлової енергії називається **фотон**.

Після відкриття Планка почала розвиватися нова, найсучасніша та глибока фізична теорія – квантова теорія. Розвиток її не закінчився й дотепер. Енергію кванта можна виразити в джоулях або в електрон-вольтах:

$$1\text{eV}=1,6\cdot 10^{-19}\text{ Дж}$$

### Енергія фотона рівняння Планка

Енергія фотона по Планку дорівнює:  $E_{\phi} = h\nu$ ,  $\nu = \frac{c}{\lambda}$

де  $h$  – постійна Планка,

$\nu$  – частота світла,  $c=3\cdot 10^8$  м/сек. – швидкість світла.

### Маса, імпульс фотона.

Фотон— квант електромагнітного поля, елементарна частинка, що є носієм електромагнітної взаємодії.

Енергія фотона по Енштейну

$$E_{\phi} = m_{\phi}c^2; \quad h\nu = m_{\phi}c^2 \quad \text{Маса фотона: } m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2}$$

Імпульс фотона визначають за формулою

$$p_{\phi} = m_{\phi}c = \frac{h\nu}{c^2} \cdot c = \frac{h\nu}{c} \quad p_{\phi} = \frac{h\nu}{c} \quad \text{імпульс фотона}$$

### Фотоефект

Відкриття явища фотоефекту мало велике значення для більшого розуміння природи світла. Але цінність науки полягає не тільки в тому, що вона з'ясовує складну і багатогранну будову навколишнього середовища, а і в тому, що наука дає нам в руки засоби, за допомогою яких можна удосконалити виробництво, поліпшувати умови матеріального і культурного життя.

### Фотоефект. Закони фотоефекту.

Фотоефект був відкритий 1887 року Г. Герцем, а потім досліджений експериментальне російським ученим А. Г. Столетовим.

**Фотоефект** – явище виривання електронів із твердих і рідких речовин під дією світла.

Розрізняють:

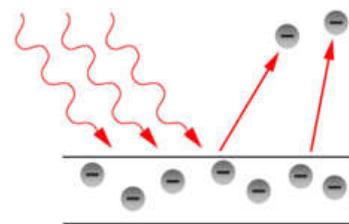
1) Зовнішній фотоефект – виривання електронів з речовини під дією світла.

2) Внутрішній фотоефект – перерозподіл електронів за енергетичними рівнями під дією світла(електромагнетного випромінювання).

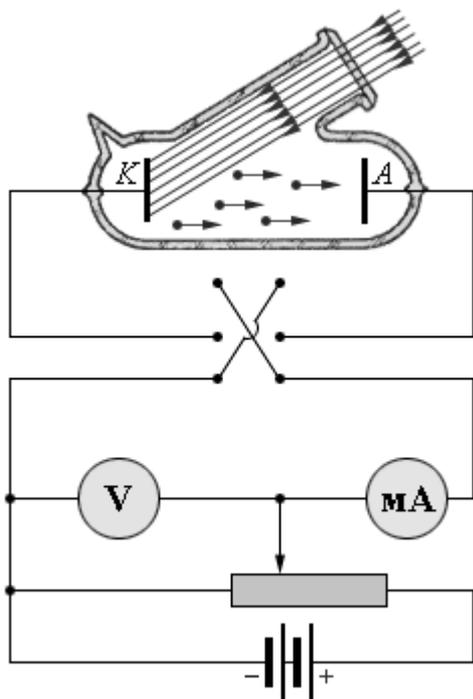
**Закони фотоефекту** були експериментально встановлені професором Московського університету А. Г. Столетовим:

- сила фотоструму насичення прямо пропорційна інтенсивності світла, що падає на катод;

- максимальна початкова швидкість фотоелектронів не залежить від інтенсивності падаючого світла, а визначається тільки його частотою;

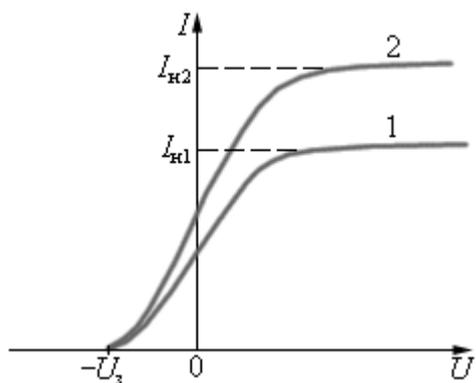


- для кожної речовини існує мінімальна частота світла, називана червоною межею фотоефекту, нижче за яку фотоефект неможливий.



**Рис. 1:** Схема експериментальної установки для вивчення фотоефекту.

В експерименті використовувався скляний вакуумний балон з двома металевими електродами, поверхня яких була ретельно очищена. До електродів прикладалась деяка напруга  $U$ , полярність якої можна було міняти за допомогою подвійного ключа. Один з електродів (катод  $K$ ) через кварцове віконце освітлювався монохроматичним світлом з довжиною хвилі  $\lambda$ , і при незмінному світловому потоці досліджувалась залежність сили фотоструму  $I$  від прикладеної напруги (рис. 2).



**Рис. 2:** Залежність сили фотоструму від прикладеної напруги. Крива 2 відповідає більшій інтенсивності світлового потоку.  $I_{n1}$  і  $I_{n2}$  – струми насичення,  $U_3$  – запираюча напруга.

#### Рівняння Ейнштейна.

Закон збереження енергії для процесу взаємодії фотона з електроном під час фотоефекту описується рівнянням Ейнштейна:

$$h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{m_e V_e^2}{2},$$

де  $A$  – робота виходу електрона з речовини,

$\frac{m_e V_e^2}{2}$  – кінетична енергія електрона

Мінімальна енергія фотона, яка достатня для одержання фотоефект, дорівнює:

$$A_{\text{вих}} = h\nu_{\text{min}}$$

*Рівняння Ейнштейна можна розглядати як вираження закону збереження енергії для одиничного акту взаємодії фотона з електроном.*

$E_k = U_3 \cdot e$ , де  $e$  – заряд електрона.

*Червона границя фотоефекту* – мінімальна частота або максимальна довжина падаючої хвилі, за якої все ще спостерігається фотоефект:

$$\begin{aligned} h \cdot \nu_{\text{min}} &= A_{\text{вих}}; & \nu_{\text{min}} &= A_{\text{вих}}/h. \\ \text{Або: } hc/\lambda_{\text{max}} &= A_{\text{вих}}; & \lambda_{\text{max}} &= hc/A_{\text{вих}} \end{aligned}$$

*Зовнішній фотоефект* – випускання електронів із поверхні металу під дією світла. Прилади, в основі принципу дії яких лежить явище фотоефекту, називаються фотоелементами. У фотоелементах енергія світла керує енергією електричного струму або перетворюється на неї.

### **Фотосинтез та його роль в с.-г.**

Фотосинтез — процес синтезу органічних сполук з вуглекислого газу та води з використанням енергії світла й за участю фотосинтетичних пігментів: (хлорофіл у рослин, хлорофіл, бактеріохлорофіл і бактеріородопсин у бактерій), часто з виділенням кисню як побічного продукту. Це надзвичайно складний процес, що включає довгу послідовність координованих біохімічних реакцій. Він відбувається у вищих рослинах, водоростях, багатьох бактеріях, деяких археях і найпростіших — організмах, відомих разом як фототрофи. Сам процес відіграє важливу роль у кругообігу вуглецю у природі.

В ході світлової стадії фотосинтезу утворюються високоенергетичні продукти: аденозинтрифосфат, що служить в клітині джерелом енергії, і НАДФН, що використовується як відновник. Як побічний продукт виділяється кисень.

Хлорофіл виконує дві функції: поглинання і передачу енергії.

Фотосинтез є основним джерелом біологічної енергії, фотосинтезуючі автотрофи використовують її для утворення органічних речовин з неорганічних, гетеротрофи існують за рахунок енергії хімічних зв'язків, запасеної автотрофами, вивільняючи її в процесах аеробного та анаеробного дихання. Енергія, отримувана людством при спалюванні викопного палива (вугілля, нафта, природний газ, торф), також є запасеною в процесі фотосинтезу.

Фотосинтез є головним методом залучення неорганічного вуглецю в біологічний цикл. Весь кисень атмосфери біогенного походження і є побічним продуктом фотосинтезу. Формування окиснювальної атмосфери повністю змінило стан земної поверхні, зробило можливою появу дихання, а надалі, після утворення озонового шару, дозволило життю вийти на сушу.

- 1) **Зовнішній фотоелектричний ефект** – виривання електронів з речовини під дією світла;
- 2) **внутрішній фотоелектричний ефект**, при якому відбувається лише збільшення кількості вільних електронів всередині речовини, але вони не виходять назовні;
- 3) **фотогальванічний ефект**, при якому на границі поділу напівпровідника і металу або на границі поділу двох напівпровідників під впливом опромінювання виникає електрорушійна сила (за відсутності зовнішнього електричного поля);
- 4) **фотоелектричний ефект в газоподібному середовищі**, який полягає у фотоіонізації окремих молекул або атомів.

**Зовнішній фотоелектричний ефект** спостерігається у твердих тілах, а також у газах.

Фотоелектричний ефект відкрив у 1887 р. Г. Герц, а перші фундаментальні дослідження фотоелектричного ефекту виконані у 1898 р. Леонард і Томсон методом відхилення зарядів у

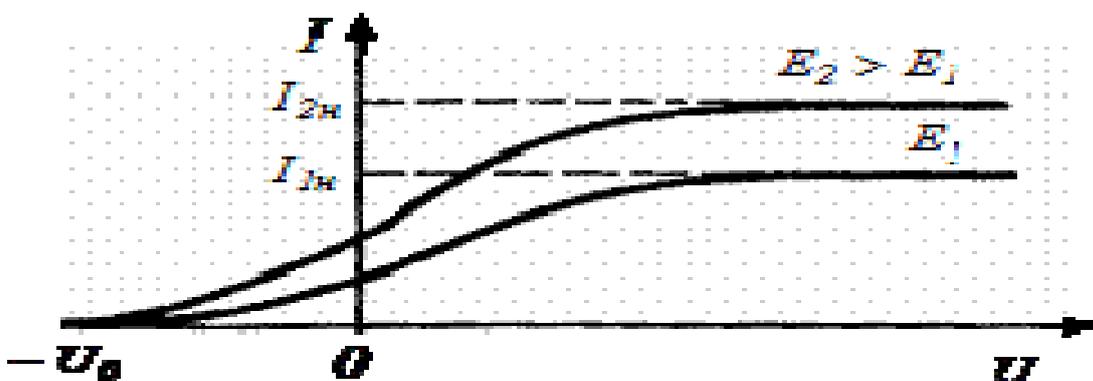
електричному і магнітному полях визначили питомий заряд  $\frac{e}{m}$  частинок, що вириваються світлом з катода, довівши, що ці частинки є електронами.

Дослідами встановлено такі основні **закони зовнішнього фотоелектричного ефекту**:

I. При фіксованій частоті  $\nu$  падаючого світла кількість фотоелектронів, що вириваються з катода за одиницю часу, пропорційне до інтенсивності світла (сила фотоструму насичення пропорційна до енергетичної освітленості  $E$  катода) (рис. 3.1).

II. Максимальна початкова швидкість  $v_{max}$  фотоелектронів визначається лише частотою  $\nu$  світла і не залежить від його інтенсивності. Величина  $v_{max}$  зростає із збільшенням частоти  $\nu$ .

III. Для кожної речовини існує „червона межа” фотоелектричного ефекту, тобто максимальна



**Рис. 3.1**

довжина хвилі  $\lambda_{red}$ , при якій спостерігається фотоелектричний ефект. Величина  $\lambda_{red}$  залежить від хімічної природи тіла і стану його поверхні. А. Ейнштейн в 1905 р. показав, що явище фотоелектричного ефекту і його закономірності можуть бути пояснені на основі запропонованої ним квантової теорії фотоелектричного ефекту.

Згідно з Ейнштейном, світло частотою  $\nu$  не лише випромінюється, але і поширюється в просторі і поглинається речовиною окремими порціями, енергія яких  $\epsilon = h\nu$ , де  $h$  – стала Планка. Поширення світла треба розглядати не як неперервний хвильовий процес, а як потік локалізованих у просторі дискретних світлових квантів, що рухаються зі швидкістю поширення світла у вакуумі. Ці кванти отримали назву **фотонів**.

За Ейнштейном кожний фотон поглинається лише одним електроном. Тому кількість вирваних фотоелектронів повинна бути пропорційна до кількості поглинутих фотонів, тобто пропорційна до інтенсивності світла (I закон фотоелектру). Безінерційність фотоелектру пояснюється тим, що передача енергії при зіткненні фотона з електроном відбувається майже миттєво.

Енергія падаючого фотона витрачається на виконання електроном роботи виходу  $A$  з металу і на надання електрону масою  $m$ , який вилетів з металу, кінетичної

$$\text{енергії } \frac{mv^2}{2}.$$

За законом збереження енергії

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}.$$

Це рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоелектру.

Рівняння Ейнштейна дає змогу пояснити II і III закони фотоелектру. Максимальна кінетична енергія фотоелектрона лінійно зростає із збільшенням частоти падаючого випромінювання і не залежить від його інтенсивності, оскільки ні робота виходу  $A$ , ні частота  $\nu$  від інтенсивності світла не залежать (II закон). Оскільки із зменшенням частоти світла кінетична енергія фотоелектронів зменшується, то при деякій досить малій частоті  $\nu = \nu_{\text{мін}}$  кінетична енергія фотоелектронів буде дорівнювати нулю. Тому енергії кванта вистачає тільки, щоб вирвати електрон з металу. Отже,

$$h\nu_{\text{мін}} = h \frac{c}{\lambda_{\text{мін}}} = A.$$

Величина  $\lambda_{\text{мін}}$  залежить лише від роботи виходу електрона, тобто від хімічної природи речовини і стану її поверхні.

Якщо створити поле всередині вакуумного фотоелемента, яке затримуватиме рух електронів, тобто на катод подати „+”, а на анод „-”, то фотострум буде зменшуватись і при напрузі  $U_0$  струм дорівнюватиме нулю (див. рис. 3.1). Ця напруга називається затримуючою напругою. Тоді

$$eU_0 = \frac{mv^2}{2},$$

а рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоелектру матиме вигляд

$$h\nu = A + eU_0.$$

Останнє рівняння можна записати також таким чином

$$U_0 = \frac{h}{e} \cdot \nu - \frac{A}{e}.$$

Ця формула описує графічно пряму  $U_0 = f(\nu)$ , яка має кут нахилу  $\alpha$  до осі  $\nu$ , причому  $\text{tg } \alpha = h/e$ , а точка перетину цієї прямої з віссю  $U_0$  дає значення  $A/e$  (рис. 2).

Визначаючи для двох різних частот та падаючого випромінювання значення напруг  $U_{01}$  та  $U_{02}$ , можна отримати формулу для визначення сталої Планка  $h$ :

$$h = \frac{e \cdot (U_{01} - U_{02})}{(\nu_1 - \nu_2)}$$

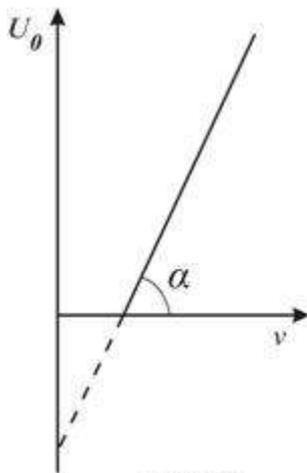


Рис. 3.2

Оскільки інтенсивність світла прямо пропорційна кількості фотонів, то збільшення інтенсивності падаючого світла приводить до збільшення числа фотоелектронів, тобто до збільшення фотоструму Іф. Якщо припустити, що джерело світла точкове, то можна вважати, що освітленість Е катода змінюється обернено пропорційно квадрату відстані від джерела світла до фотоелемента. Так як освітленість Е пропорційна інтенсивності світла, то величина фотоструму Іф буде пропорційна потоку випромінювання.

## Модуль 8. Будова атома.

### Лекція №15 Будова атома. Елементи фізики атомного ядра

План:

1. Відкриття, які доводять складність будови атому.
2. Модель атома Резерфорда.
3. Постулати Бора.
4. Будова ядра атома.
5. Склад атомних ядер. Заряд і масове число ядра.
6. Енергія зв'язку ядер.

### Модель атома Томсона.

До 1902 року було здійснено достатньо експериментів, які переконливо довели існування електронів.

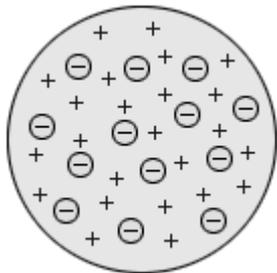


Рис. 1. Модель атома Дж. Томсона.

Джозеф Джон Томсон показав на основі класичної електромагнітної теорії, що розміри електрона мають бути порядку  $10^{-15}$  м. Крім того, було відомо, що розміри атома становлять кілька ангстрем ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10}$  м). На цій підставі Томсон в 1903 році запропонував свою модель атома, відповідно до якої атоми являють собою однорідні кулі з позитивно зарядженої речовини, у якій містяться електрони (див.

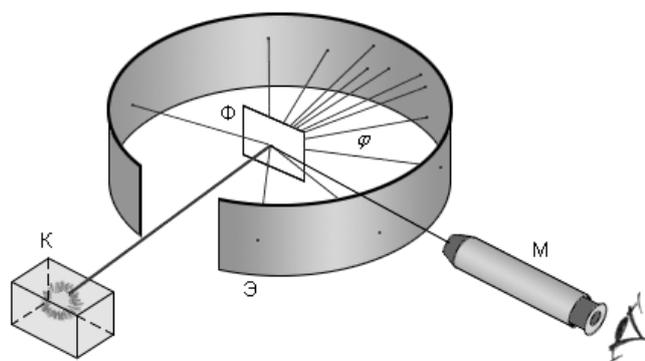
рис.). Сумарний заряд електронів дорівнює позитивному заряду атома. Тому атом у цілому електрично нейтральний.

Ця модель дістала назву «пудинг», оскільки електрони були вкраплені в позитивно заряджене середовище, немов ізюм у пудинг.

Модель Томсона здавалася привабливою з тієї точки зору, що передбачала наявність електронів в атомі. Однак вона проіснувала тільки до 1911 року.

### Досліди Резерфорда.

У 1911 році Ернст Резерфорд запропонував своїм співробітникам експериментальне перевірити переконливість моделі атома Томсона. Ідея досліду була проста. Якщо модель атома Томсона відповідає дійсності, то експериментатори, пропускаючи крізь дуже тонку металеву плівку вузький пучок швидких  $\alpha$ -частинок, не повинні виявити скільки-небудь помітного відхилення цих частинок.



**Рис. 2** Схема досліду Резерфорда по розсіянню  $\alpha$ -частинок.

К – свинцевий контейнер з радіоактивною речовиною  
Э – екран, покритий сірчастим цинком

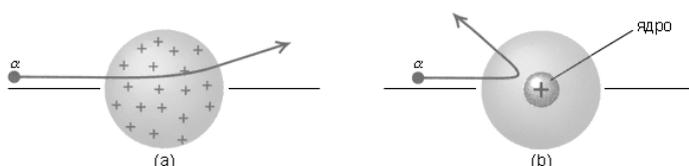
Ф – золота фольга

М – мікроскоп.

Резерфорд встановив, що кожна  $\alpha$ -частинка, потрапляючи на екран із сірчастого цинку, викликає спалах світла. Зазнавши розсіювання в золотій фользі,  $\alpha$ -частинки вдарялися потім в екран і реєструвалися за допомогою мікроскопа.

Очікувалося, що пучок  $\alpha$ -частинок під час проходження крізь тонку фольгу злегка розсіюється на невеликі кути. Це дійсно спостерігалось. Але несподівано з'ясувалося, що приблизно одна  $\alpha$ -частинка з 20 000, які падають на золоту фольгу завтовшки усього лише  $4 \cdot 10^{-5}$  см, повертається назад у бік джерела.

Резерфордові знадобилося кілька років, щоб остаточно зрозуміти таке несподіване розсіювання  $\alpha$ -частинок на великі кути. Він дійшов висновку, що позитивний заряд атома зосереджений у дуже малому об'ємі в центрі атома, а не розподілений по всьому атому, як у моделі Томсона.



**Рис. 3.** Розсіяння  $\alpha$ -частинок в атомі Томсона (а) і в атомі Резерфорда (б).

### Ядерна модель атома Резерфорда:

1) атоми будь-якого елемента має позитивно зарядже ядро;

2) до складу ядра входять позитивно заряджені елементарні частинки – протони і нейтральні нейтрони;

3) навколо ядра рухаються негативно заряджені електрони.

*Дослід Е. Резерфорда започаткував основи сучасних уявлень про будову атома*

Щоб пояснити одержані результати, Е. Резерфорд припустив, що атом має складну будову, схожу на Сонячну систему: всередині його міститься позитивно заряджене ядро, навколо якого обертаються електрони



Його розрахунки довели, що в ядрі зосереджена практично вся маса атома, але його розміри набагато менші за сам атом. Вимірювання показали, що лінійні розміри атома становлять приблизно  $10^{-10}$  м, а радіус його ядра дорівнює близько  $10^{-15}$  м. Зрозуміло, що схематичні зображення атомів тут і в інших книгах подаються без дотримання масштабів.

Отже, на підставі одержаних експериментальних даних Е. Резерфорд запропонував ядерну (планетарну) модель атома, яка узгоджувалася з результатами дослідів і пояснювала багато інших явищ, пов'язаних з будовою атома.

*Висновок:* Планетарна модель атома, запропонована Резерфордом, стала важливим кроком в розвитку знань про будову атома. Проте, вона виявилася нездатною пояснити сам факт тривалого існування атома, тобто його стійкість. За законами класичної електродинаміки, рухомий з прискоренням заряд повинен випромінювати електромагнітні хвилі. За короткий час (близько  $10^{-8}$  с) всі електрони в атомі Резерфорда повинні розтратити всю свою енергію і впасти на ядро. Те, що цього не відбувається в стійких атомах, показує, що внутрішні процеси в атомі не підкоряються класичним законам.

В результаті досліджень було встановлено, що ядро атома дуже стабільна частинка. Незважаючи на те що до складу ядра входять позитивні протони і нейтральні нейтрони зруйнувати ядро можливо тільки за допомогою **ядерних реакцій**.

Всі хімічні елементи мають **ізотопи**. Ізотопи даного хімічного елемента відрізняються кількістю протонів. Наприклад, ізотопи Гідрогену:  ${}^2_1\text{H}$  – *дейтерій*,  ${}^3_1\text{H}$  – *тритій*. Ізотопи мають однакові хімічні властивості, але можуть відрізнятися фізичними властивостями, а саме радіоактивністю.

За допомогою ядерних реакцій можна дістати радіоактивні ізотопи всіх хімічних елементів, які зустрічаються в природі тільки в стійкому стані.

### **Масове й зарядове числа.**

В якості одиниці маси в атомній і ядерній фізиці використовується атомна одиниця маси (**а.о.м.**).

Атомна одиниця маси дорівнює 1/12 маси атома Карбону атомною масою 12.

**1 а.о.м. =  $1,66057 \cdot 10^{-27}$  кг.**

Ціле число, найближче до атомної маси, вираженої в а.о.м., називається масовим числом і позначається буквою **A**.

Число протонів у ядрі називається зарядовим числом (зарядом ядра) і позначається буквою **Z**.

Для кожного хімічного елемента заряд ядра дорівнює порядковому номеру в таблиці Д. І. Менделєєва.

В загальному вигляді хімічний елемент позначається так:  ${}^A_Z\text{X}$ .

Число нейтронів у ядрі позначають буквою **N**.  **$N = A - Z$** .

Кожний хімічний елемент в таблиці Д. І. Менделєєва електронейтральний тому що кількість протонів в ядрі дорівнює кількості електронів на орбітах атома. Ця кількість відповідає порядковому номеру в таблиці Д. І. Менделєєва.

Змінити електронну оболонку атома можливо тепловою, світловою, хімічною та механічною енергіями.

Атом, який утратив (чи набув) один або кілька електронів, перетворюється на позитивним (або негативним) йон.

Позитивно заряджене тіло – кількість електронів в тілі менша, чим кількість протонів в ядрах атомів із яких складається тіло

Негативно заряджене тіло – кількість електронів в тілі більша, чим кількість протонів в ядрах атомів із яких складається тіло

### **Будова атомного ядра.**

Сьогодні фізики усього світу користуються теорією про те, що ядро складається з елементарних частинок — протонів і нейтронів. Уперше таке припущення висловив у 1932 році радянський фізик Д. Д. Іваненко. Однак протонно-нейтронна модель ядра не відразу була прийнята ученими. Навіть Резерфорд стверджував, що нейтрон — лише складне утворення протона й електрона. У 1933 році Іваненко виголосив доповідь про моделі ядра, відстоюючи протонно-нейтронну теорію. Він спирався на те, що в ядрі є тільки важкі частинки. Іваненко відкинув ідеї про складну структуру нейтрона й протона. На його думку, обидві частинки повинні мати однаковий ступінь елементарності, тобто і нейтрон, і протон можуть переходити один в одного. Надалі протон і нейтрон почали розглядатися як два стани однієї частинки — нуклона, й ідея Іваненко стала загальноприйнятою, а незабаром у складі космічних променів була відкрита ще одна елементарна частинка — позитрон.

Зараз протонно-нейтронна модель ядра вже не викликає сумнівів. Крім того, протягом довгого часу існувала гіпотеза про те, що в ядрі можуть знаходитися також і електрони. Однак вона мала дуже багато протиріч і не була підтверджена експериментально. Так, відповідно до цієї гіпотези, масове число повинно відповідати загальній кількості протонів у ядрі, а різниця масового числа й кількості електронів повинна дорівнювати зарядові ядра. Ця модель не суперечила значенням ізотопних мас і зарядів, однак не погоджувалася зі значеннями магнітних моментів ядер, спінів й енергій зв'язку ядра. Крім того, вона спростовувала співвідношення невизначеностей Гейзенберга, відповідно до якого неможливо одночасно встановити певну координату ( $X, Y, Z$ ) і певну відповідну

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar,$$

$$\Delta y \Delta p_y \geq \hbar,$$

$$\Delta z \Delta p_z \geq \hbar,$$

проекцію імпульсу ( $p_x, p_y, p_z$ ) мікрочастинки:

де  $\hbar$  — константа Планка.

У результаті цього протонно-нейтронна модель ядра була відкинута.

**Краплинна модель ядра**

Краплинна модель ядра була запропонована в 1936 році Бором і Френкелем. Вона ґрунтувалася на аналогії між поведінкою нуклонів у ядрі та поведінкою молекул у краплі рідини. В обох випадках сили, що діють між складовими частинками рідини (молекулами) і ядра (нуклонами), є короткодійними, і їм властиве насичення. Для краплі рідини при постійних зовнішніх умовах характерною є постійна густина речовини. Ядра ж характеризуються практично постійною питомою енергією зв'язку і постійною густиною, що не залежить від числа нуклонів у ядрі. Нарешті, розмір краплі, як і розмір ядра, пропорційний до числа частинок. Однак ця модель представляє ядро як краплю електрично зарядженої нестисливої рідини з густиною, що дорівнює ядерній. Ця рідина підпорядковується законам квантової механіки. Краплинна модель ядра дозволила одержати напівемпіричну формулу для енергій зв'язку нуклонів у ядрі, пояснила механізм ядерних реакцій і особливо добре описала реакції розподілу ядра. Однак вона не пояснює підвищену стійкість ядер, що містять магічні числа протонів і нейтронів.

**Оболонкова модель ядра**

У 50-х роках двадцятого століття американець М. Гепперт-Майер і німець Х. Йенсен виступили з оболонковою моделлю ядра. Відповідно до неї розподіл нуклонів у ядрі відбувається за дискретними енергетичними рівнями (оболонками), що заповнюються нуклонами відповідно до принципу Паулі. До того ж вона пов'язала заповнення цих рівнів зі стійкістю ядер. Вважається, що ядра з повністю заповненими оболонками є найбільш стійкими. Такі особливо стійкі (магічні) ядра справді існують. Це ядра, в яких число протонів або число нейтронів дорівнює одному з магічних чисел (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126).

Оболонкова модель ядра дозволила пояснити спіни і магнітні моменти ядер, різну стійкість атомних ядер, а також періодичність змін їхніх властивостей. Ця модель особливо добре описує легкі й середні ядра, а також ядра в основному (незбудженому) стані.

У міру подальшого нагромадження експериментальних даних про властивості атомних ядер з'являлися нові факти, які не завжди вкладалися в рамки описаних моделей. Так виникли узагальнена модель ядра (синтез краплинної й оболонковій моделі), оптична модель ядра (пояснює взаємодію ядер із частинками, що налітають) і багато інших.

### **Ядерні сили.**

Нуклони в ядрі атома утримуються завдяки ядерним силам, які є проявом однієї з чотирьох фундаментальних взаємодій — сильної взаємодії. За своєю природою вони короткодіючі ( $r \sim 10\text{-}15$  м), але дуже інтенсивні. У межах атомного ядра вони майже у 100 разів переважають сили електростатичної взаємодії двох протонів і в 1038 разів — силу їхньої гравітаційної взаємодії. Проте на відстанях, більших за розміри ядер, вони настільки малі, що їхньою дією можна знехтувати.

Ядерні сили діють незалежно від наявності в нуклонах електричного заряду. Внаслідок цього в атомному ядрі утримуються електронейтральні нейтрони і не розлітаються однойменно заряджені протони. Експериментальні дослідження сил ядерної взаємодії протон-протонних, протон-нейтронних і нейтрон-нейтронних пар показали, що в усіх випадках вони однакові і не залежать від типу нуклона.

Ядерні сили — короткодіючі, оскільки проявляють себе на відстанях у межах атомного ядра (10-15 м)

Обмінний характер ядерної взаємодії подібний до ковалентного зв'язку між атомами в молекулі, де роль такого «посередника» відіграють валентні електрони

У 1935 р. японський фізик Х. Юкава висунув припущення, що природа ядерних сил полягає в їхньому обмінному характері, тобто, за його передбаченням, наявність ядерних сил зумовлює гіпотетична частинка ненульової маси, якою обмінюються між собою нуклони під час взаємодії.

### **Ізотопи.**

Ізотопи (від грец. *isos* — однаковий і *topos* — місце) — різновиди одного й того самого хімічного елемента, що відрізняються за атомними масами

Нейтрон (від лат. *neſſigit* — ні те, ні інше) — нестабільна електрично нейтральна, тобто така, що не має ні позитивного, ні негативного заряду, елементарна частинка

У сучасній фізиці протони і нейтрони в ядрі називають нуклонами (від лат. *шкіеш* — ядро)

Число нуклонів у ядрі атома дорівнює його масовому числу  $A$ . Число протонів у ядрі атома дорівнює заряду ядра  $Z$ . Число нейтронів  $N = A - Z$

У тому ж році радянський вчений Д. Д. Іваненко (українець за походженням, народився в Полтаві) і німецький фізик В. Гейзенберг незалежно один від одного запропонували оболонкову протонно-нейтронну модель ядра атома. Вони припустили, що атомне ядро складається з нуклонів — протонів і нейтронів, які розміщуються певними групами й утворюють ядерні оболонки. Кожен нуклон перебуває в певному квантовому стані, який характеризується енергією та набором інших квантових величин.

Згідно з цією моделлю, загальне число нуклонів, тобто сума протонів і нейтронів у ядрі атома, дорівнює масовому числу атома  $A$ ; число протонів дорівнює заряду ядра атома  $Z$ , число нейтронів  $N = A - Z$ . В ядерній фізиці ізотоп хімічного елемента  $X$  прийнято позначати відповідним символом із зазначенням його масового числа  $A$  (зліва вгорі) і зарядового числа  $Z$  (зліва внизу), тобто у вигляді  $AZX$ . Наприклад, найлегший ізотоп Гідрогену — протій, ядро якого складається з одного протона, позначають  ${}^1_1\text{H}$ , альфа-частинку, що є ядром атома Гелію,  ${}^4_2\text{He}$  тощо.

Заповнення ядерних оболонок підлягає певній закономірності — принципу Паулі: два тотожні нуклони не можуть одночасно перебувати в однаковому квантовому стані, тобто характеризуватися одним і тим самим набором квантових чисел. Тому існує ряд чисел — 2, 8, 20, 28, 40, 50, 82, 126, названих магічними, які визначають максимальне число нуклонів у заповнених оболонках.

Перехід ядра атома з одного стану в інший, наприклад із стабільного у збуджений чи навпаки, за оболонковою моделлю пояснюють як квантовий перехід нуклона з однієї оболонки на іншу. Щоразу, коли число протонів чи нейтронів стає магічним, відбувається стрибкоподібна зміна величин, які характеризують властивості ядра. Цим, зокрема, пояснюють фізичну причину існування періодичності у властивостях хімічних елементів, відображену періодичною системою Д. І. Менделєєва.

Принцип Паулі спочатку був сформульований для пояснення закономірностей у заповненні електронних орбіталей в атомі; згодом він був поширений на всі елементарні частинки з напівцілим спіном

Принцип Паулі є фізичною суттю періодичного закону Д. І. Менделєєва

Оболонкова модель атомного ядра є однією з найпродуктивніших у ядерній фізиці, зокрема в поясненні періодичності властивостей ядер і механізму ядерних реакцій. Проте вона також має свої обмеження, оскільки неспроможна розтлумачити властивості важких ядер і пояснити всі типи взаємодії нуклонів у ядрі. Тому існують також інші моделі атомних ядер, наприклад, крапельна, згідно з якою атомне ядро уявляють у формі краплі особливої квантової рідини.

### Дефект маси.

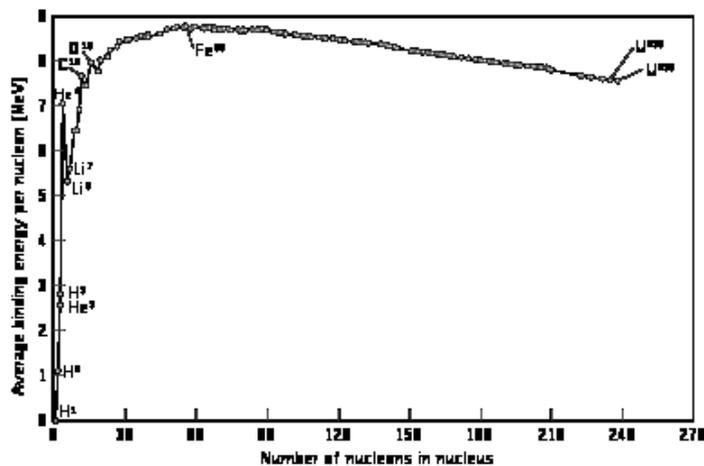
Дефект маси — різниця між масою спокою атомного ядра даного ізотопу, вираженої в атомних одиницях маси, і сумою мас спокою складових його нуклонів (масовим числом). Позначається  $\Delta m$ .

Згідно із формулою Ейнштейна дефект маси і енергія зв'язку нуклонів в ядрі еквівалентні:

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

де  $c$  — швидкість світла у вакуумі.

Дефект маси характеризує стійкість ядра.



Дефект маси, віднесений до одного нуклона, називається пакувальним множником.

Дефект маси виникає внаслідок притягання між нуклонами у ядрі завдяки сильній взаємодії. Він найбільший для ядер в середині періодичної таблиці (як видно із наведеного рисунка) і зменшується при збільшенні атомного номера елемента. Завдяки цьому поділі важких елементів, наприклад, урану або плутонію, вивільняється енергія. З іншого боку, як видно з рисунка, енергію можна отримати також при утворенні ядра гелію з ядер водню. Такий процес називається ядерним синтезом. Він є джерелом енергії зірок.

### **Енергія зв'язку.**

Енергією зв'язку складної системи зв'язаних об'єктів називають різницю між сумою енергій складових частин, взятих окремо й енергією системи у зв'язаному стані.

$$\Delta E = \sum_i E_i - E,$$

де  $\Delta E$  - енергія зв'язку,  $E_i$  - значення енергії складових, взятих окремо,  $E$  - енергія складної системи.

Саме така енергія виділяється у вигляді теплової при утворенні зв'язаного стану, наприклад, при хімічній реакції. Саме таку енергію потрібно затратити, щоб розділити складові частини зв'язаної системи.

## Література

1. Загальна фізика. Оптика : оглядові лекції / уклад. В. М. Кадченко. Кривий Ріг : КДПУ, 2020. 70 с. URL: [http://elibrary.kdpu.edu.ua/bitstream/123456789/4159/1/ДЕК\\_ОГЛЯДОВІ%20ЛЕКЦІЇ\\_2.pdf](http://elibrary.kdpu.edu.ua/bitstream/123456789/4159/1/ДЕК_ОГЛЯДОВІ%20ЛЕКЦІЇ_2.pdf)
2. Ashrafuzzaman M. Introduction to modern biophysics. Free Shipping, 2024. 235 p.
3. Коцюбинський В. О., Бойчук В. М. Фізика (вибрані питання) : курс лекцій. Івано-Франківськ : ДВНЗ “Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника”, 2021. 309 с. URL: <http://lib.pnu.edu.ua:8080/bitstream/123456789/9429/1/Фізика%20вибрані%20питання%29.pdf>
4. Коцюбинський В. О., Бойчук В. М. Фізика : курс лекцій. Івано-Франківськ : ДВНЗ “Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника”, 2020. 310 с. URL: [http://lib.pnu.edu.ua:8080/bitstream/123456789/6649/1/Курс%20лекцій\\_фізика.pdf](http://lib.pnu.edu.ua:8080/bitstream/123456789/6649/1/Курс%20лекцій_фізика.pdf)
5. Лекції з курсу загальної фізики . Розділ І. Механіка / уклад. М. І. Правда. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 55 с. URL: [http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/7495/1/MV\\_Pravda.pdf](http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/7495/1/MV_Pravda.pdf)
6. Лекції з курсу загальної фізики. Розділ ІV. Хвильова оптика / уклад. М. І. Правда. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 20 с. URL: [http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/7498/1/MV\\_Pravda.pdf](http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/7498/1/MV_Pravda.pdf)
7. Лекції з курсу загальної фізики. Розділ ІІ. Молекулярна фізика та термодинаміка / уклад. М. І. Правда. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 36 с. URL: [http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/7496/1/MV\\_Pravda.pdf](http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/7496/1/MV_Pravda.pdf)
8. Лекції з курсу загальної фізики. Розділ ІІІ. Електрика та магнетизм / уклад. М. І. Правда. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 56 с. URL: [http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/7497/1/MV\\_Pravda.pdf](http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/7497/1/MV_Pravda.pdf)
9. Павло В. Фізика. Основи і механічний рух : підручник. Одеса : Book Chef, 2020. 384 с.
10. Calculation of Optimal Geometric Parameters Electrical Apparatus for Controlling the Irrigation System / O. Sadovoy et al. 2023 *IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 27–30 September 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/mees61502.2023.10402456>
11. Comparison of Active Power Losses of Single-Phase Electromagnetic Static Devices by Radial Electromagnetic System / O. Sadovoy et al. 2022 *IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 20–23 October 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/mees58014.2022.10005760>
12. Technological Parameters Of The Magnetic Circuit Of The Compact Transformer For Aggregate Electric Drive / E. Avdieieva et al. 2020 *IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-4, DOI: <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240779>.
13. Development of a Model of Cell Functioning to Measure the Interaction of Low-Energy EMF / M. Kundenko et al. 2022 *XXXII International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)*, Sozopol, Bulgaria, 7–11 September 2022. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/mma55579.2022.9993093>.

14. Терещенко М. Ф., Яковенко І. О., Тимчик Г. С. Біофізика та основи моделювання біомедичних процесів і систем. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. 421 с.

Навчальне видання

## **ФІЗИКА З ОСНОВАМИ БІОФІЗИКИ**

Методичні рекомендації

Укладач:

**Вахоніна** Лариса Володимирівна

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 7,2.

Тираж 20 прим. Зам. № \_\_\_\_\_

Надруковано у видавничому відділі

Миколаївського національного університету

54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4490 від 20.10.2013р.