

В.Ф.Савченко, М.П.Бойко, М.М.Дідович,  
В.М.Закалюжний, М.П.Руденко

# **Конспекти лекцій з методики навчання фізики в старшій школі**

Посібник для студентів  
фізико-математичних факультетів  
педагогічних вищих навчальних закладів

**За ред. проф. В.Ф.Савченка**

Чернігів  
2007

УДК 53(07)  
С 13  
ББК В3р10

**Рецензенти:** доктор пед. наук, професор *Сиротюк В.Д.*,  
доктор фіз.-мат. наук, професор *Мельничук О.В.*

**С 13 Савченко В.Ф., Бойко М.П., Дідович М.М., Закалюжний В.М., Руденко М.П. Конспекти лекцій з методика навчання фізики в старшій школі / Методика навчання окремих тем програми. За ред. проф. В.Ф.Савченка. – Чернігів: ЧДПУ, 2007. – 288 с.**

**ISBN №978-966-77-43-63-5**

У посібнику викладено основи методики вивчення окремих тем програми фізики старшої школи. Він розрахований на використання в самостійній роботі студентів фізичних спеціальностей фізико-математичних факультетів педагогічних ВНЗ та в системі післядипломної освіти вчителів фізики середньої школи.

УДК 53(07)  
ББК В3р10

Рекомендовано вченою радою  
Чернігівського державного педагогічного університету імені Т.Г. Шевченка  
(протокол № 4 від 28 листопада 2007 р.)

**ISBN №978-966-77-43-63-5**

© Савченко В.Ф., Бойко М.П.,  
Дідович М.М., Закалюжний В.М.,  
Руденко М.П., 2007

---

## **ВСТУП**

Суттєвим елементом системи формування фахових якостей майбутнього вчителя є самостійна робота студента. Організація навчальної роботи на засадах повної самостійності сприяє не тільки засвоєнню ним фактичного матеріалу, передбаченого програмою, але і сприяє також формуванню аналітичного стилю мислення, пізнавальних здібностей, фахового світогляду. Ідеальною формою організації такої роботи є вивчення першоджерел, у яких відображено не тільки результати дослідження, але і методологію, яка була закладена в нього.

Разом з тим, така організація праці студента може приводити на початковому етапі до нераціонального витрачання часу на пошуки потрібного матеріалу, подолання тупикових варіантів, неминучих у випадку вибору помилкових шляхів чи методів роботи.

Дієвим шляхом подолання можливих помилок у самостійній роботі і підвищення її ефективності є використання програмових, консультативних дидактичних матеріалів, за змістом і структурою спрямованих на організацію ефективної цілеспрямованої навчальної роботи студентів на засадах раціоналізму.

Читачеві пропонується методична розробка, яка має за мету забезпечити певну основу для організації самостійної роботи як у випадку опрацювання нового, базового навчального матеріалу, так і при повторенні й узагальненні на завершальних етапах навчання.

Конспективний характер викладу обраний з огляду на необхідність організації самостійної роботи як за класичними посібниками, так і за публікаціями в періодичній методичній літературі, в яких викладено результати новітніх досліджень та кращий досвід учителів фізики.

Структура посібника обрана такою, щоб він міг сприяти ефективному повторенню і закріпленню матеріалу лекцій з методики навчання фізики і організації самостійної роботи студента над першоджерелами. У зв'язку з цим виклад матеріалу стислий і відображає основні ідеї методики навчання окремих логічно окреслених тем програми, спрямовує подальшу роботу над першоджерелами.

Розробляючи зміст і структуру конспектів, автори враховували як існуючі напрацювання в царині методики організації навчального процесу в середній школі, так і перспективи розвитку методики фізики у зв'язку з переходом на 12-річний термін навчання і технологізацію навчального процесу з фізики. Широка демократизація процесу навчання фізики в школі, передбачена реформою школи, спонукала до вибору такої структури посібника, яка сприяла б формуванню в студентів аналітичного підходу при розробці власної технології навчання з урахуванням варіативності програм і підручників.

З огляду на це в конспектах подано лише аналіз основних понять, науковий аналіз та обґрунтування змісту теми. Подаються лише зразки типових задач, які найбільшою мірою забезпечують ефективний процес формування практичних умінь учнів, поглиблюючи знання учнів, отримані на уроках. Okремо виділяється аналіз різних варіантів побудови методик з огляду на дидактичну мету і конкретні умови роботи вчителя. Проблеми організації фізичного експерименту з'ясовуються з посиланням на існуючі посібники з методики і техніки шкільного фізичного експерименту.

Усі конспекти, крім останнього, мають єдину структуру, план якої складається з семи частин.

1. Науково-методичний аналіз змісту і структури теми.
2. Основні поняття і їх науково-методичний аналіз.
3. Навчальний фізичний експеримент.
4. Методика вивчення основних питань теми.
5. Типові задачі.
6. Організація контролю і обліку знань учнів.
7. Питання для самоконтролю.

Усі пункти універсального плану відображені в тексті конспектів.

На основі подібних міркувань подано і єдиний список літературних джерел, посилання на які зустрічаються в тексті чи рекомендуються для поглибленого вивчення того чи іншого питання.

---

## Розділ I

# МЕХАНІКА

### Лекція I.

#### Методика вивчення теми “ОСНОВИ КІНЕМАТИКИ”

##### 1. Науково-методичний аналіз змісту і структури теми

Вивчення механіки в старшій школі традиційно розпочинається з кінематики. У цьому розділі механіки розглядається механічний рух тіл без урахування їх взаємодії з іншими тілами. У змісті даної теми можна виділити три розділи: “Основні поняття кінематики”, “Прямолінійний нерівномірний рух” та “Криволінійний рух”. При вивченні першої частини розділу передбачається формування в школярів понять матеріальної

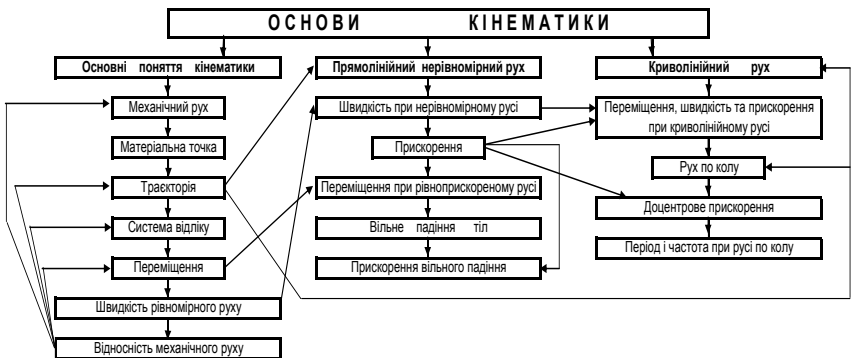
точки, механічного руху, системи відліку, вводяться фізичні величини, які характеризують механічний рух: шлях, траєкторія, переміщення, швидкість. Тут формулюється основна задача механіки та знаходиться її розв’язок для випадку прямолінійного рівномірного руху.

У другій частині “Кінематики” вивчається прямолінійний нерівномірний рух, з’ясовується питання про швидкість при такому русі, вводяться поняття середньої та миттєвої швидкостей, прискорення, виводиться формула для знаходження переміщення при рівноприскореному русі. Як приклад рівноприскореного руху розглядається вільне падіння тіл та прискорення вільного падіння.

Завершується вивчення теми розглядом питання про криволінійний рух, в якому розглядаються питання про переміщення, швидкість та прискорення при такому русі. Як частинний випадок криволінійного руху вивчається рух по колу, вводиться поняття доцентрового прискорення, періоду та частоти обертання тіла, а також зв’язок між цими величинами.

Характерною особливістю розділу є широке застосування графічного методу при з’ясуванні залежностей між фізичними величинами, які описують механічний рух.

Структурно-логічна схема теми



При організації навчального процесу вивчення розділу потрібно враховувати, що в курсі фізики основної школи учні вже вивчали механічний рух та деякі його характеристики, а глибоке розуміння кінематики необхідне як для подальшого вивчення механіки, так і для вивчення наступних розділів фізики в старшій школі.

## **2. Основні поняття теми та їх науково-методичний аналіз**

Основними поняттями даної теми є: механічний рух, поступальний рух, матеріальна точка, система відліку, траєкторія, переміщення, шлях, швидкість, прискорення.

Під *механічним рухом* тіла розуміють зміну з часом його положення в просторі відносно інших тіл. Із означення механічного руху витікає, що не можна говорити про рух відокремленого тіла – рух завжди відбувається відносно якихось інших тіл. Причому, відносно одних тіл дане тіло може рухатись, а відносно інших – перебувати в спокої.

Одним із видів механічного руху є *поступальний рух* – такий рух, під час якого всі точки тіла рухаються однаково. При такому русі пряма, проведена через дві довільні точки тіла, залишається паралельною сама собі. Оскільки під час поступального руху тіла всі його точки рухаються однаково, то немає потреби описувати рух кожної з них – достатньо описати рух якої-небудь однієї точки цього тіла.

*Матеріальною точкою* в класичній механіці вважають тіло, розміри та форма якого несуттєві в даному випадку. Уведення поняття матеріальної точки дає можливість при вивченні поступального руху тіла розглядати рух лише однієї точки.

Під *системою відліку* розуміють систему координат, тіло відліку, з яким вона пов’язана, та спосіб вимірювання часу.

*Траєкторією руху* тіла називають геометричне місце точок, у яких перебувало тіло під час свого руху. Виходячи із геометричної форми траєкторії руху, визначають вид цього руху (прямолінійний чи криволінійний).

**Переміщенням** тіла називається напрямлений відрізок, що сполучає початкове положення тіла з його наступним положенням. Отже, переміщенням точки задається вектор, який називається вектором переміщення. Вектор переміщення зазвичай позначають  $\vec{s}$ . Модуль (довжину) вектора переміщення позначають  $|\vec{s}|$  або ж  $s$ . Вимірюють довжину переміщення в метрах.

**Шляхом** називається довжина траєкторії тіла. Він є скалярною величиною, вимірюється в метрах і одним з його позначень є буква  $l$ . Шлях, пройдений тілом, не менший за модуль його переміщення. Якщо рух прямолінійний, і тіло здійснювало переміщення лише в одному напрямку, то шлях і модуль переміщення однакові; в усіх інших випадках шлях більший за модуль переміщення.

Під **швидкістю** прямолінійного рівномірного руху розуміють фізичну величину, що характеризує механічний рух і чисельно дорівнює відношенню переміщення тіла до проміжку часу, протягом якого відбулося це переміщення. Швидкість є векторною величиною, її напрям співпадає з напрямом переміщення. Позначають швидкість  $\vec{v}$ . Тоді  $\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$ .

У окремих випадках при вивченні нерівномірного руху користуються **середньою швидкістю**, яка показує, чому дорівнює переміщення, що його тіло здійснює в середньому за одиницю часу:  $\vec{v}_c = \frac{\vec{s}}{t}$ . Часто, розглядаючи середню швидкість,

мають на увазі не вектор, а скалярну величину, що визначається довжиною шляху, пройденого тілом у середньому за одиницю часу:  $v_c = \frac{l}{t}$ .

Введення поняття середньої швидкості не дає можливості розв'язати основну задачу механіки. Тому користуються поняттям **миттєвої швидкості** (швидкості тіла в даний момент часу або в даній точці траєкторії), яка дорівнює відношенню досить



малого переміщення на ділянці траєкторії, що прилягає до цієї точки, до інтервалу часу, який прямує до нуля.

Одним із видів нерівномірних рухів тіл є **рівноприскорений** – такий рух, під час якого швидкість зміни швидкості залишається сталою. Розгляд такого руху вимагає введення поняття *прискорення* – фізичної величини, що характеризує прискорений рух і чисельно дорівнює відношенню зміни швидкості тіла до інтервалу часу, протягом якого ця зміна відбулася: 
$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}.$$

Таке означення прискорення використовується й при розгляді інших видів нерівномірних рухів тіл. **Прискорення** є векторною величиною, але його напрям не завжди співпадає з напрямом переміщення чи швидкості тіла.

### 3. Навчальний фізичний експеримент

**Демонстрації.** Відносність руху [27, с. 26; 9, с. 26]. Прямолінійний і криволінійний рух [27, с. 25; 27, с. 50]. Додавання переміщень [27, с. 23; 9, с. 28]. Падіння тіл у повітрі та розрідженому просторі [27, с. 42; 9, с. 33]. Напрямок швидкості при русі по колу [27, с. 50; 9, с.37].

**Лабораторні роботи:** передбачається виконання лабораторної роботи “Визначення прискорення тіла при рівноприскореному русі”.

### 4. Методика вивчення основних питань теми

Вивчення механічного руху розпочинають із з’ясування понять фізичного тіла та матеріальної точки. Формування цих понять необхідно здійснювати з самого початку вивчення механіки, уточнивши їх та визначивши випадки, коли можна користуватись кожним із цих понять. Учні повинні засвоїти, що матеріальна точка є абстракцією такого реального тіла, розмірами та формою якого за даних умов можна знехтувати, тобто, коли тіло можна розглядати як геометричну точку, маса якої дорівнює масі тіла. Якщо ж істотну роль відіграють розміри та

форма тіла, то користуються поняттям твердого тіла – сукупності матеріальних точок, відстань між двома точками якого є сталою величиною. З метою формування цих понять доцільно розглянути конкретні приклади, на яких з'ясувати, за яких умов тіло можна вважати матеріальною точкою, а за яких – ні.

Іншим важливим поняттям даної теми є поступальний рух тіла. Взагалі тіло може здійснювати різні механічні рухи: поступальні, коливальні, обертальні. Але в курсі механіки загальноосвітньої школи детально вивчається лише поступальний рух, тому поняття про цей рух необхідно сформуванати на перших уроках фізики. З цією метою звертають увагу учнів на те, що в загальному випадку різні точки рухомого тіла рухаються неоднаково.

Найпростішим, але найважливішим випадком руху тіла є такий рух, при якому всі точки тіла описують однакові траєкторії. Такий рух називають поступальним. Для нього характерним є те, що будь-яка пряма, проведена через будь-які дві точки тіла, при поступальному русі залишається паралельною сама собі. Для міцнішого засвоєння даного поняття доцільно запропонувати учням навести приклади механічних рухів та виділити серед них поступальні, а також провести відповідні демонстрації.

Особливу увагу необхідно приділити формуванню в школярів поняття системи відліку. Необхідність введення цього поняття обґрунтовується на початку вивчення кінематики при розгляді питання про однозначне визначення положення тіла в просторі. Без вибору системи відліку неможливо спостерігати та вивчати рух матеріальної точки чи тіла. Засвоєння цього поняття сприятиме також розумінню учнями принципу відносності.

Поняття системи координат учням уже відоме з курсу математики, а поняття системи відліку для учнів є новим і досить складним. Для кращого розуміння цього поняття доцільно разом із учнями проаналізувати його зміст (під системою відліку розуміють систему координат, тіло відліку, з яким вона зв'язана, і прилад для вимірювання часу). При вивченні необхідно досягнути, щоб учні чітко розрізняли поняття: система відліку, тіло відліку та система координат. Тому на уроці недостатньо перелі-

чити основні елементи системи відліку, необхідно обґрунтувати необхідність їх введення. Це доцільно зробити на конкретних прикладах, розглядаючи та описуючи рух тіл.

Важливо також навчити учнів вибирати систему відліку в конкретних випадках. Сам вибір системи відліку є довільним, обумовленим міркуваннями зручності для проведення обчислень. Від вибору системи відліку залежить, зокрема, форма траєкторії руху тіла. У цьому необхідно переконати школярів на конкретних дослідах.

Вивчаючи поняття переміщення, необхідно спочатку обґрунтувати необхідність його введення. Так, у механіці-науці існує два способи вивчення руху, тобто два способи розв'язання основної задачі механіки – природний та координатно-векторний. Перший спосіб вивчення руху не вимагає введення поняття вектора, а його задовольняють алгебраїчні значення механічних величин. Дійсно, якщо точка рухається по певній траєкторії, то можна вибрати додатній напрямок і початковий момент руху. Потім, відраховуючи відстань, пройдену точкою до даного моменту часу, можна визначити положення її в просторі, тобто розв'язати основну задачу механіки. При такому способі розв'язання основної задачі механіки повинні бути відомі траєкторія та залежність шляху від часу. У найпростішому випадку рівномірного руху точки задача розв'язується легко ( $l = vt$ ).

Якщо ж траєкторія руху заздалегідь не задана, то розв'язання задачі ускладнюється. Усе це вказує на обмежені можливості природного методу. Координатно-векторний спосіб, на відміну від природного, дозволяє розв'язувати основну задачу механіки в загальному вигляді. Усе це необхідно пояснити учням у доступній формі на конкретних прикладах. З цією метою учням можна запропонувати визначити кінцеве положення поїзда та теплохода, якщо відомі їх початкові положення, швидкість та час руху.

Необхідно також звернути увагу учнів на відмінність понять переміщення та шляху, а також відмінність їх від координати точки. Шлях, пройдений точкою, дорівнює довжині

траєкторії, яка описується протягом даного проміжку часу при русі точки з одного положення в інше. Звертають увагу учнів на те, що шлях – це скалярна величина. Переміщення – це відрізок прямої, що з'єднує попередню точку траєкторії з наступною і спрямований у бік останньої. Переміщення – це векторна величина. Тому слід досягти усвідомлення учнями різниці між цими поняттями.

*Примітка.* Поняття вектора вивчається учнями в курсі геометрії основної школи. Але в геометрії вектор розглядають як радіус-вектор, який задається координатами його кінця. Дії над векторами в геометрії зводяться до дій над їх координатами. У курсі фізики старшої школи під вектором розуміють напрямлений відрізок, а дії над векторами виконують геометрично з використанням дій над проекціями на осі прямокутної системи координат.

Розглядаючи конкретні рухи тіл, разом з учнями з'ясовують, що шлях завжди є додатнім. Шляхи між двома даними точками можуть бути різними, а переміщення між цими точками завжди одне й те ж. У випадку прямолінійного руху точки переміщення за модулем може співпадати з шляхом лише тоді, коли напрямок руху не змінюється. Коли ж точка змінює напрямок свого руху, то переміщення та шлях будуть різними. Для кращого розуміння учнями цього матеріалу доцільно виконати відповідні малюнки, на яких зобразити шляхи та переміщення тіл. Результативним є використання географічних карт, на яких зручно демонструвати відмінність між переміщенням і шляхом.

У шкільному курсі фізики вводяться основні характеристики руху – швидкість та прискорення – як загальні, за допомогою яких можна розпізнавати характер руху, попередньо ввівши систему відліку. Так, якщо швидкість і прискорення дорівнюють нулю, то тіло знаходиться в стані спокою в даній системі координат. Якщо швидкість стала, а прискорення дорівнює нулю, то маємо справу з рівномірним прямолінійним рухом. У випадку, коли прискорення стале (швидкість змінюється на одне й те ж значення за одиницю часу), тіло здійснює рівноприскорений рух.

З поняттям швидкості рівномірного руху учні знайомі з базового курсу фізики основної школи. Тому при розгляді даного матеріалу в старшій школі необхідно лише підкреслити суттєві ознаки прямолінійного рівномірного руху, при якому за будь-які рівні послідовні інтервали часу тіло здійснює однакові переміщення. Звертають увагу учнів на відмінність даного означення від того, яке їм знайоме із базового курсу, де мова йшла не про переміщення тіла, а про пройдений ним шлях.

Із базового курсу учням відоме також визначення швидкості прямолінійного руху як фізичної величини, яка чисельно дорівнює відношенню шляху, пройденого тілом за певний інтервал часу, до значення цього інтервалу часу. Таке означення потрібно вважати пропедевтичним для більш загального означення швидкості як векторної величини. В усіх підручниках і посібниках з фізики для основної школи окремо наголошується, що швидкість має напрям. У курсі механіки старшої школи є можливість дати означення швидкості як векторної величини, за яким швидкість визначається відношенням вектора переміщення

$\vec{s}$  до інтервалу часу  $t$ , протягом якого відбувається рух:  $\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$ .

Таке означення є новим для учнів старшої школи, і тому його означення слід детально проаналізувати, звернувши увагу на те, що швидкість – величина векторна, а її напрям співпадає з напрямком переміщення. У той же час необхідно наголосити, що інколи доцільно користуватись поняттям тільки модуля швидкості. Наголошують також на тому, що швидкості, як і переміщення, додаються геометрично. Проте розв'язання основної задачі механіки на основі лише векторних рівнянь неможливе. Тому учням потрібно дати знання про використання для цього координатного методу. Координатний метод виробляє загальний підхід до опису явищ та сприяє зв'язку фізики з математикою, а також дозволяє наблизити трактування основних понять і законів до тієї, яка прийнята в науці, дозволяє здійснити загальний підхід до вивчення законів руху та підвищити рівень узагальнення знань.

Так, обравши певну систему відліку, можна визначити проекції вектора на осі прямокутної системи координат, які є скалярними величинами і з ними можна проводити алгебраїчні операції. Якщо спроекувати вектори переміщення та швидкості на осі координат, можна записати рівняння руху матеріальної точки чи тіла в скалярній формі:  $x = x_0 + v_x t$ . Таким чином, знаючи початкову координату та швидкість тіла, можна розв'язати основну задачу механіки для прямолінійного рівномірного руху.

Одним із найважливіших понять кінематики (та й фізики в цілому) є поняття відносності руху. На початку вивчення даного матеріалу учням доцільно обґрунтувати необхідність його вивчення. З цією метою потрібно розповісти, що в практиці зустрічаються випадки, коли рух одного і того ж тіла доводиться розглядати відносно різних тіл відліку, які самі рухаються одне відносно одного. При цьому виникає необхідність вивчати особливості руху даного тіла відносно двох систем відліку, одна з яких рухається відносно іншої. Умовно прийнявши одну із систем за нерухому, можна з'ясувати, які переміщення та швидкості в нерухомій та рухомій системах має дане тіло. Важливо підкреслити, що при цьому мова йде про переміщення, які здійснюються протягом одного і того ж інтервалу часу. При розгляді даного матеріалу використовують демонстраційний експеримент [27, с. 26; 27, с. 23]. На основі експерименту доцільно подати формулу додавання переміщень  $\vec{s} = \vec{s}_0 + \vec{s}_1$ , а на її основі вивести формулу додавання швидкостей  $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{v}_1$ . З метою підвищення дієвості знань учнів і формування практичних умінь учнів отримані залежності у вигляді формул використовуються при розв'язуванні задач.

Крім рівномірного прямолінійного руху в кінематиці вивчається також нерівномірний рух, для характеристики якого використовуються відповідні фізичні поняття. Формування в учнів поняття про нерівномірний рух розпочалося ще до вивчення курсу фізики на основі спостережень та життєвого досвіду і продовжилось під час вивчення базового курсу фізики. Тому вивчення даного матеріалу доцільно проводити, опираючись на

ці уявлення учнів. Розглядаючи різні приклади нерівномірного руху та проводячи відповідні досліди, дають означення такого руху: *рух, при якому тіло за будь-які рівні проміжки часу здійснює неоднакові переміщення, називають нерівномірним.*

Необхідно поглибити також поняття середньої швидкості, яку в базовому курсі розглядали як частку від ділення шляху на час руху тіла. У систематичному курсі старшої школи варто наголосити, що в даному випадку ми розглядали середню швидкість як скалярну величину. Таким поняттям зручно користуватися, розглядаючи задачі практичного змісту. Для міцнішого засвоєння учнями поняття середньої швидкості доцільно запропонувати їм розв'язати відповідні задачі.

Але в фізиці середня швидкість може розглядатися і як векторна величина, що визначається відношенням переміщення до інтервалу часу, за який це переміщення відбулося:

$$\vec{v}_c = \frac{\vec{s}}{t}.$$

На базі знань учнів про середню швидкість формується поняття миттєвої швидкості. Актуалізуючи проблему, звертають увагу учнів на те, що знання середньої швидкості недостатнє для вивчення нерівномірного руху, оскільки не дозволяє розв'язати основну задачу механіки. Вивчаючи даний матеріал, разом із учнями з'ясовують, що будь-який рух можна розглядати як низку послідовних рівномірних прямолінійних рухів, які відбуваються протягом нескінченно малих інтервалів часу  $\Delta t$ . Протягом кожного такого інтервалу часу швидкість можна вважати сталою. Ця швидкість може бути визначена за формулою  $\vec{v} = \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}$ .

Твердження про сталість швидкості протягом дуже малого інтервалу часу ґрунтується на припущенні про те, що при поділі цього інтервалу часу на дві рівні частини модуль різниці переміщень рухомої точки за час  $\Delta t$  безмежно малий у порівнянні з модулями самих переміщень. Це означає, що при подальшому

зменшені інтервалу часу  $\Delta t$ , зміни модуля та напрямку вектора  $\frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}$  настільки незначні, що їх уже неможливо виявити.

Зовсім новим для учнів старшої школи є поняття прискорення. Тому формуванню цього поняття потрібно надати особливої уваги. Цей процес потрібно побудувати на тому, що учні вже знають, що при нерівномірному русі швидкість змінюється з плином часу і в різних точках траєкторії її значення будуть різними. Такі зміни для різних фізичних тіл можуть бути різними, а тому для характеристики цього процесу вводиться фізична величина, яка показує, як змінюється швидкість тіла протягом одиничного інтервалу часу. Ця фізична величина отримала назву прискорення:

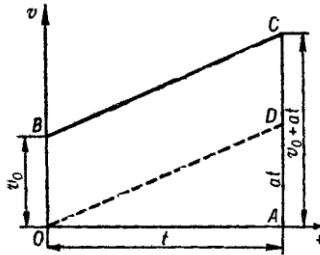
$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}.$$

Після цього варто звернути увагу учнів на те, що як кожна фізична величина прискорення може мати різні значення. Навіть рух одного й того ж тіла може бути таким, що прискорення буде змінюватися. Але учнів потрібно застерегти, що програмою передбачене вивчення лише таких рухів тіл, при яких прискорення залишається сталим для даного тіла. Означення прискорення дозволяє знайти миттєву швидкість рівноприскореного руху в даний момент, якщо відомі початкова швидкість і час. Для цього

потрібно розв'язати рівняння  $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$  відносно  $v$ . Таким чи-

ном учні отримують формулу для миттєвої швидкості рівноприскореного руху:  $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$ . Аналіз отриманої формули дозволяє зробити висновок, що для визначення швидкості в будь-який момент часу в рівноприскореному русі необхідно знати початкову швидкість та прискорення. На завершення, звертають увагу учнів на те, що прискорення в системах відліку, які рухаються прямолінійно і рівномірно одна відносно одної, однакове та не залежить від вибору системи відліку.





Мал. 1

Розглядаючи графік швидкості при рівноприскореному русі (мал. 1), виводять формулу переміщення під час такого руху. При цьому переміщення чисельно буде дорівнювати площі трапеції, обмеженої осями координат  $v$  та  $t$ , прямою графіка швидкості та прямою графіка вибраного часу. При виведенні цієї формули слід мати на увазі, що формулу для визначення площі трапеції в курсі геометрії учні ще не вивчали.

Існує також інший підхід до виведення формули переміщення під час рівноприскореного руху. Оскільки розглядається рух рівноприскорений, то середня швидкість на певному проміжку руху може бути визначена як середнє арифметичне початкової та кінцевої швидкостей, тобто  $v_c = \frac{v_0 + v}{2}$ . Враховуючи, що  $v = v_0 + at$ , одержують формулу:

$$\vec{s} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a} t^2}{2}.$$

Працюючи над виведенням формули для переміщення, потрібно пам'ятати, що для спрощення викладок розглядається рівноприскорений прямолінійний рух, в якому проекції прискорення і швидкостей на напрям руху мають однаковий знак. Векторна форма запису отриманих формул подається як узагальнення отриманого у скалярній формі рівняння.

Вивчаючи вільне падіння тіл та прискорення вільного падіння, необхідно звернути увагу учнів на те, що це є один з випадків рівноприскореного руху тіла, при якому тіло може

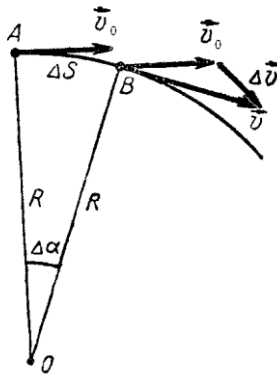
вільно падати як із стану спокою, так і маючи деяку початкову швидкість. Учніям можна запропонувати самостійно записати формули для вільного падіння:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t; \quad \vec{H} = \vec{v}_0t + \frac{\vec{g}t^2}{2}.$$

Вивчення криволінійного руху передбачає формування в учнів понять про напрям переміщення та швидкості при такому русі, доцентрове прискорення, період та частоту обертання тіла по колу. Важливим моментом у вивченні цього матеріалу є встановлення того, що напрями переміщення та миттєвої швидкості в криволінійному русі не співпадають: переміщення буде напрямлене по хордах дуги, а швидкість – по дотичній до цієї дуги в певній точці. При формуванні уявлень про напрям швидкості при криволінійному русі необхідно звернутися до життєвого досвіду учнів та провести відповідні демонстрації. Оскільки рух по колу є окремим випадком криволінійного руху, а будь-який криволінійний рух можна розглядати як рух по дугах кіл, то вивчають саме такий рух. Це дає можливість значно спростити математичні розрахунки та виведення відповідних формул. У шкільному курсі фізики розглядають рух по колу із сталою за модулем швидкістю (сталою лінійною швидкістю). Лінійна швидкість є векторною величиною (вона спрямована по дотичній до кола в даній точці), а її модуль визначається відношенням довжини дуги, що проходить тіло за певний час, до цього інтервалу часу:

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t}.$$

Пристаючи до формування поняття доцентрового прискорення, спочатку з'ясовують, що означає зміна швидкості. Учні до цього часу розглядали прямолінійний рівномірний рух (коли модуль і напрям швидкості не змінювались) та змінний рух (коли модуль швидкості змінювався, а напрям залишався сталим). Підкреслюють, що швидкість є векторною величиною, тому необхідно враховувати зміну швидкості як за величиною, так і за напрямком (мал. 2).



Мал. 2

Розглядаючи рух точки по колу  $R$ , та виділивши дві точки  $A$  і  $B$ , у яких швидкість тіла відповідно дорівнює  $\vec{v}_0$  та  $\vec{v}$ , знаходимо зміну швидкості  $\Delta\vec{v} = \vec{v} - \vec{v}_0$ . Зрозуміло, що зміна швидкості, навіть при сталому її модулі, не дорівнює нулю, а отже, такий рух буде прискореним. Модуль цього прискорення визначається формулою  $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ . Напрямок цього прискорення не співпадає з напрямком швидкості. Зближуючи точки на траєкторії, можна помітити, що вектор  $\Delta\vec{v} = \vec{v} - \vec{v}_0$  спрямований до центра кола. Отже, і прискорення  $\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$  спрямоване до центра кола, яке описує тіло, і його називають доцентровим.

На завершення вивчення теми розглядають питання про період  $T$  та частоту  $n$  руху тіла по колу, одиниці їх вимірювання, взаємозв'язок між ними  $T = \frac{1}{n}$  та виводять формулу для значення прискорення тіла при русі по колу радіуса  $R$  із частотою  $n$ :  $a = 4\pi^2 n^2 R$ . Ця формула знаходить застосування в подальшому викладі навчального матеріалу, зокрема, для аналі-

зу демонстрацій при вивченні другого закону Ньютона за допомогою легко рухомого диска.

Узагальнення знань учнів можна провести на тему “Кінематичні величини та взаємозв’язок між ними”. На уроці необхідно з’ясувати, що рівномірний прямолінійний рух є частинним випадком прискореного руху (коли  $a = 0$ ), а прямолінійний рух – частинний випадок криволінійного руху (коли  $R \rightarrow \infty$ ). Слід підкреслити також, що такі поняття кінематики як рух, спокій, траєкторія, координата, переміщення, швидкість є відносними, в той час як *довжина, прискорення, час* у класичній механіці не залежать від вибору системи відліку.

З метою узагальнення знань учнів на даному уроці доцільно скористатися зведеною таблицею порівняння кінематичних величин та формул:

Вид механічного руху	Переміщення	Швидкість	Прискорення	Координата
1. Рівномірний прямолінійний рух	$\vec{s} = \vec{v}t;$ $s = vt$ Вектори $\vec{s}$ і $\vec{v}$ розташовані на одній прямій	$\vec{v} = const$	$\vec{a} = 0$	$x = x_0 + v_x t$ $y = y_0 + v_y t$ $z = z_0 + v_z t$
2. Рівноприскорений прямолінійний рух	$\vec{s} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2}$ $s = v_0 t + \frac{at^2}{2}$	$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$ $v = v_0 + at$	$\vec{a} = const$ $a = (v - v_0) / t$	$x = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}$ $x = x_0 + v_{0x} t + \frac{at^2}{2}$ $y = y_0 + v_y t + \frac{at^2}{2}$ $z = z_0 + v_z t + \frac{at^2}{2}$

Вид механічного руху	Переміщення	Швидкість	Прискорення	Координата
3. Рівномірний рух точки по колу	Вектор $\vec{s}$ спрямований під кутом до вектора $\vec{v}$	Швидкість змінюється тільки за напрямком $ \vec{v}  = \frac{2\pi R}{T}$	Прискорення змінюється за напрямком $ \vec{a}  = \frac{v^2}{R}$	$x = f(t)$ $y = f(t)$
4. Криволінійний рух точки (загальний випадок)	Вектор $\vec{s}$ спрямований під кутом до вектора $\vec{v}$	Швидкість $\vec{v}$ змінюється за модулем та напрямком	Прискорення $\vec{a}$ змінюється за модулем та напрямком	$x = f(t)$ $y = f(t)$ $z = f(t)$

## 5. Типові задачі

У процесі вивчення даної теми розв'язують задачі наступних типів:

### ►► На використання понять матеріальної точки та фізичного тіла

Вказати, у яких випадках тіла можна вважати матеріальними точками, а в яких – ні: 1. Земля рухається по коловій орбіті навколо Сонця; під час місячного затемнення Місяць потрапляє в тінь Землі. 2. Молекула водяної пари здійснює зигзагоподібний рух; молекула води складається з двох атомів водню та одного атома кисню.

### ►► На використання системи координат та системи відліку

Накреслити в певному масштабі план класу та, вибравши систему координат, визначити в ній координати місця, де ви знаходитесь.

**► На дії над векторними величинами**

Огинаючи острів, корабель проплив 10 км на північ, 15 км на північний схід і 8 км на схід. Знайти шлях, який проплив корабель, та його переміщення. На скільки кілометрів перемістився корабель на північ і схід).

**► На використання формул додавання переміщень та швидкостей**

Швидкість вертикального підйому краном вантажу  $5 \frac{м}{хв.}$ , а швидкість крана відносно землі –  $10 \frac{м}{хв.}$ . Визначити швидкість вантажу відносно землі.

**► На обчислення середньої швидкості**

Автомобіль за перші 7 хв. руху проїхав 8 км, а за наступні 3 хв. – 4 км. Знайти середню швидкість руху автомобіля на цьому шляху).

**► На обчислення прискорення**

Рухаючись із швидкістю  $27 \frac{км}{год.}$ , мотоцикліст, побачивши перешкоду, загальмував і зупинився через 2 с. З яким середнім прискоренням зупинився мотоцикліст ?

**► На обчислення швидкості та переміщення при рівноприскореному русі**

Початкова швидкість кулі пневматичної гвинтівки  $160 \frac{м}{с}$ . Яку швидкість буде мати куля через 20 с після пострілу, спрямованого вертикально вгору? Якої висоти вона досягне за цей час?

**► На криволінійний рух**

Чи можна встановлювати точильний круг на вал електродвигуна, що робить  $3000 \frac{об.}{хв.}$ , якщо на крузі є штамп заводу “ $40 \frac{м}{с}$ ;  $R=125 \text{ мм}$ ”? Знайти доцентрове прискорення точок, розташованих на робочій поверхні круга.

## 6. Організація контролю і обліку знань учнів

Під час вивчення даної теми з метою перевірки засвоєння учнями основних понять та формул доцільно провести фізичні диктанти після вивчення основних понять кінематики та криволінійного руху. Після вивчення прямолінійного нерівномірного руху слід провести самостійну роботу, включивши до неї графічні та розрахункові задачі. Контрольну роботу проводять після вивчення всієї теми.



### Питання для самоконтролю

1. Які питання вивчаються в темі “Основи кінематики”?
2. Які поняття формуються в даній темі?
3. Які демонстрації та лабораторні роботи передбачаються програмою при вивченні даної теми?
4. Які особливості введення поняття системи відліку?
5. У чому полягає необхідність введення поняття миттєвої швидкості?
6. Як вводиться формула переміщення при рівноприскореному русі?
7. Написати (назвати) рівняння руху для прямолінійного рівномірно та рівноприскореного рухів.
8. На яких прикладах з’ясовують питання про напрям швидкості при криволінійному русі?

---

## Лекція 2

### Методика вивчення теми “ОСНОВИ ДИНАМІКИ”

#### 1. Науково-методичний аналіз змісту та структури теми

Після вивчення кінематики розпочинається ознайомлення учнів із основами динаміки. У цій темі вивчається взаємодія тіл та рух тіл під час цієї взаємодії. Тема складається із трьох частин: “Закони Ньютона”, “Сили в механіці” та “Рух тіла під дією кількох сил”. У першій частині вивчаються перший закон Ньютона, вводиться поняття інерціальної системи відліку, маси та сили, вивчається другий закон Ньютона, додавання сил та третій закон Ньютона. У другій частині вивчаються гравітаційні сили, закон всесвітнього тяжіння, сила тяжіння, рух під дією сили тяжіння, рух штучних супутників та розрахунок першої космічної швидкості. Тут же розглядаються сили пружності, закон Гука, невагомість, сили тертя та коефіцієнт тертя. Третя частина присвячена розгляду руху тіл під дією кількох сил: рух у горизонтальному та вертикальному напрямках, рух похилою площиною, рух зв’язаних тіл та рух по колу.

Вивчення даної теми передбачає широке використання математичного апарату, демонстраційного експерименту, а також знань, набутих учнями як під час вивчення фізики в основній школі, так і під час вивчення теми “Основи кінематики”. Знання законів динаміки учням необхідне для подальшого вивчення механіки, та інших наступних розділів курсу фізики.

Освітнє та прикладне значення теми полягає в тому, що через вивчення нового розділу механіки, в якому використовується потужний математичний апарат, в учнів формуються наукові знання про матеріальність світу та взаємну обумовленість явищ в природі, Учитель має можливість ознайомити учнів із



досягненнями світової науки та внеском у її розвиток вітчизняних вчених, що сприяє формування почуття патріотизму та гуманізму.

### Структурно-логічна схема теми



## 2. Основні поняття теми та їх науково-методичний аналіз

Основними поняттями даної теми є: інерція, інертність, інерціальна система відліку, маса, сила, гравітаційні сили, сили тертя, сили пружності.

Під *інерцією* в механіці розуміють явище збереження стану спокою чи швидкості в прямолінійному рівномірному русі при скомпенсованих зовнішніх діях. Інерція властива всім матеріальним об'єктам у однаковій мірі.

З поняттям інерції зв'язане поняття, яке описує властивість тіл набувати різних прискорень при однакових зовнішніх діях із боку інших тіл. Інертність властива різним тілам у різній мірі. Мірою інертності тіла при поступальному русі є його маса (при обертальному русі – момент інерції).

Важливим для описання процесів у механіці є поняття *інерціальної системи відліку* – системи відліку, в якій виконується закон інерції. Будь-яка система відліку, що рухається відносно інерціальної системи відліку поступально, рівномірно та прямолінійно, також є інерціальною системою відліку. Усі інерціальні системи відліку рівноправні, тобто в усіх таких системах закони фізики діють однаково. Враховуючи, що Земля рухається навколо Сонця з незначним прискоренням, систему відліку, пов'язану із Землею, лише наближено можна вважати інерціальною.

*Маса* є однією з основних фізичних характеристик матерії, яка визначає її інертні та гравітаційні властивості. У класичній механіці маса визначається відношенням сили, що діє на тіло, до прискорення, якого набуває тіло під дією цієї сили. У цьому разі маса називається інертною. Поряд із тим, маса є мірою гравітаційних властивостей тіл. У цьому разі маса називається гравітаційною. При відповідному виборі гравітаційної сталої інертна та гравітаційна маси кожного тіла співпадають. У цьому полягає принцип еквівалентності мас. Маса є адитивною величиною. У класичній механіці маса даного тіла є величиною сталою, незалежною від його стану. У релятивістській механіці маса тіла

залежить від швидкості його руху 
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
. При малих

швидкостях, значно менших за швидкість світла,  $m \approx m_0$ . За одиницю маси – кілограм – прийнято масу спеціально виготовленого циліндра з платино-іридієвого сплаву, який зберігається в Міжнародному бюро мір і ваг у місті Севрі під Парижем.

Під *силою* розуміють міру механічної дії на дане матеріальне тіло з боку інших тіл, внаслідок чого змінюється вектор швидкості цього тіла, і тіло набуває прискорення. Сила є величиною векторною і в кожний момент часу характеризується числовим значенням, напрямком у просторі та точкою прикладання.

Серед сил, які вивчаються в механіці, виділяють сили пружності, тертя та гравітаційні.

**Гравітаційні сили** – це сили взаємного притягання між усіма тілами; значення цих сил прямо пропорціональне добутку мас тіл та обернено пропорціональне квадрату відстані між ними

$$|\vec{F}| = G \frac{m_1 m_2}{r^2}. \text{ Ця залежність називається законом всесвітнього}$$

тяжіння, пріоритет у відкритті якого належить І. Ньютону. Числове значення коефіцієнта пропорційності  $G$ , який називають гравітаційною сталою, було визначено експериментально в досліджах Кавендіша.

$$\text{У міжнародній системі (СІ)} \quad G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}.$$

Одним із випадків сили всесвітнього тяжіння є *сила тяжіння*, що діє на будь-яку матеріальну точку, яка розташована поблизу земної поверхні. На значення цієї сили впливає добове обертання Землі. Напрямок сили тяжіння є вертикаль у даній точці земної поверхні.

**Сила тертя спокою** – це сила, яка виникає між двома контактуючими тілами й утримує їх у стані спокою одне відносно іншого при дії на них інших тіл. Ця сила завжди дорівнює за абсолютним значенням і напрямлена протилежно силі, що прикладена до тіла паралельно поверхні стикання його з іншим тілом. Максимальна сила тертя спокою пропорційна силі тиску:

$$|\vec{F}_m| = \mu |\vec{N}|.$$

**Сила тертя ковзання** – це сила, що виникає під час руху одного тіла поверхнею іншого і напрямлена в бік, протилежний рухові тіла. Сила тертя ковзання пропорційна силі тиску:

$$|\vec{F}_m| = \mu |\vec{N}|. \text{ Коефіцієнт пропорційності } \mu \text{ називають коефіцієнтом тертя. Його значення залежить від виду речовини, з якої}$$

виготовлено тіла, а також від стану поверхонь, що стикаються.

Коефіцієнт тертя  $\mu$  установлює зв'язок між силою тертя і силою тиску між тілами. Розрізняють коефіцієнт тертя руху і коефіцієнт тертя спокою. Коефіцієнт тертя спокою завжди менший за коефіцієнт руху:

$$\mu_{сп} > \mu_{р}.$$

У свою чергу коефіцієнт тертя руху визначається як для відносного ковзання одного тіла по поверхні другого, так і для кочення одного з тіл. Коефіцієнт тертя ковзання суттєво більший за коефіцієнт тертя кочення:

$$\mu_{\text{ков}} > \mu_{\text{коч}}$$

### **3. Навчальний фізичний експеримент**

#### **Демонстрації**

Прояв інерції [27, с. 56; 9, с. 40]. Порівняння мас тіл [27, с. 66; 27, с. 54; 9, с. 42]. Вимірювання сил [27, с. 70; 9, с. 46]. Другий закон Ньютона [27, с. 67; 35, с. 49; 9, с. 43]. Додавання сил, що діють під кутом одна до одної [27, с. 102; 35, с. 44; 9, с. 45]. Третій закон Ньютона [27, с. 72; 35, с. 52; 9, с. 48]. Центр мас тіла [35, с. 55]. Вага тіла при прискороному підніманні та падінні [35, с. 57; 9, с. 58]. Залежність дальності польоту від кута кидання [27, с. 91; 9, с. 62-65]. Невагомість [35, с. 58; 9, с. 59]. Залежність сили пружності від деформації [27, с. 75; 35, с. 61]. Сили тертя ковзання і кочення [27, с. 81; 9, с. 50; 35, с. 62]. Відцентрові механізми [27, с. 97]. Рівновага тіл під дією декількох сил [27, с. 109; 9, с. 78]. Види рівноваги [27, с. 113].

#### **Лабораторні роботи**

“Визначення жорсткості пружини”, “Визначення коефіцієнта тертя ковзання”, “Вивчення руху тіла, кинутого горизонтально”, “Вивчення рівноваги тіл під дією декількох сил”.

При поглибленому вивченні фізики додатково виконуються лабораторні роботи: “Визначення швидкості вильоту снаряда з магнітної гармати”, “Вивчення руху тіла по колу під дією сил пружності й тяжиння”, “Розрахунок і вимірювання часу прискороного руху на заданій відстані”, “Розрахунок і вимірювання відстані, пройденої тілом під дією постійно діючої сили за даний час”.

#### 4. Методика вивчення основних питань теми

Формування поняття інерції доцільно розпочати з повторення відповідного матеріалу курсу фізики основної школи: *явище збереження швидкості тіла при відсутності дії на нього інших тіл називають інерцією*. У процесі такого повторення учні можуть самостійно навести приклади прояву інерції. Важливим моментом у процесі вивчення явища інерції є з'ясування про неправильність побутового уявлення про те, що рух є результатом взаємодії тіл. З цією метою розглядають різні приклади інерції з урахуванням реально існуючих взаємодій тіл. Наприклад, з'ясовують, чому кулька, підвішена на шнурі, перебуває в стані спокою та що з нею трапиться, якщо усунути дію шнура. Внаслідок такого розгляду приходять до висновку, що тіло може знаходитись у стані спокою, якщо на нього діють рівні за модулем, але протилежно напрямлені сили, тобто, якщо дія інших тіл компенсується. На конкретних прикладах з'ясовують, що тіло може не тільки перебувати в стані спокою, а й рухатись прямолінійно рівномірно, якщо дія на нього інших тіл відсутня. Наближеним прикладом може бути хокейна шайба, яка може довго рухатись прямолінійно та рівномірно поверхнею льоду, оскільки сила тертя незначна. Аналогічно металева кулька може котитись поверхнею столу практично рівномірно, оскільки сила тертя кочення незначна.

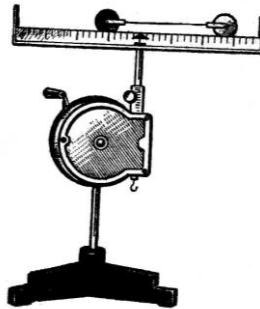
Доцільно окремо розглянути поняття про взаємну компенсацію дії взаємодіючих тіл. Оскільки в реальних випадках на будь-яке рухоме тіло діє сила опору середовища (зокрема, сила тертя), то для прямолінійного рівномірного руху тіла необхідно цю силу компенсувати іншою. Це можна продемонструвати учням, розглядаючи рух кульки похилою площиною, яка має такий нахил, щоб сила тертя компенсувалась складовою сили тяжіння. Роблять узагальнення: *тіло під дією двох однакових за модулем та протилежно напрямлених сил буде знаходитись у спокої або рухатись прямолінійно рівномірно*.

Розглянуті вище приклади дозволяють сформулювати перший закон динаміки Ньютона: існують такі системи відліку,

відносно яких тіло, що рухається поступально, зберігає свою швидкість сталою, якщо на нього не діють інші тіла або дія інших тіл компенсується. Такі системи відліку називають інерціальними.

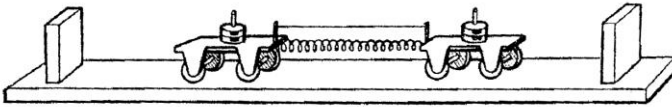
До цього часу в усіх прикладах і дослідах за систему відліку, в якій виконувався закон інерції, приймалася Земля. На конкретних прикладах (наприклад, розглядаючи рух тіл у залізничному вагоні, який рухається без прискорення прямолінійною ділянкою колії) варто показати, що закон інерції виконується також у системах відліку, які рухаються прямолінійно й рівномірно відносно Землі. Формулюють принцип відносності Галілея та на прикладах із життя спростовують побутові уявлення про те, що тіло, на яке не діють сили, може перебувати тільки в стані спокою.

З метою формування поняття маси необхідно відновити відповідний матеріал, вивчений учнями в основній школі. Після цього експериментально обґрунтовують поняття маси як кількісної характеристики інертних властивостей тіла. З цією метою на відцентровій машині встановлюють поличку з двома зв'язаними ниткою тілами, маси яких відносяться як 1:3. Привівши систему в обертання в горизонтальній площині, помічають, що тіла розходяться на певні відстані від осі обертання і рухаються по колах певного радіуса (мал. 3).



Мал. 3

Вимірявши радіуси цих кіл та розрахувавши частоту обертання стрижня, визначають, скориставшись формулою  $a = 4\pi^2 n^2 R$ , прискорення кожного тіла. У результаті досліду приходять до висновку, що під час взаємодії тіла набувають прискорень, обернено пропорційних масам тіл. Відношення прискорень для двох даних тіл є сталою величиною. На основі аналізу дослідів дають визначення маси як фізичної величини, що характеризує інертність тіла і є його мірою. Після цього вводять одиницю маси та розглядають способи вимірювання маси тіла зважуванням та через взаємодію, ілюстрацією до якого може служити дослід з двома візочками, з'єднаними пружиною (мал. 4).



Мал. 4

При формуванні поняття сили необхідно враховувати те, що воно широко використовується в повсякденному житті й певною мірою знайоме учням. Із пропедевтичного курсу фізики основної школи учням відомо, що сила є причиною зміни швидкості тіла. Але сила може бути меншою чи більшою, оскільки вона в більшій чи меншій мірі може змінювати швидкість тіла. А швидкість зміни швидкості тіла називають прискоренням. Отже, чим більше прискорення тіла, тим більша сила, що діє на нього. Модуль прискорення ж тіла може бути визначений за формулою

$$|\vec{a}_1| = \frac{m_2}{m_1} |\vec{a}_2|. \text{ З цієї формули видно, від яких величин залежить}$$

прискорення тіла та як можна кількісно визначити дію на нього іншого тіла. Добуток  $m_2 |\vec{a}_2|$  визначає модуль сили  $|\vec{F}|$ , отже

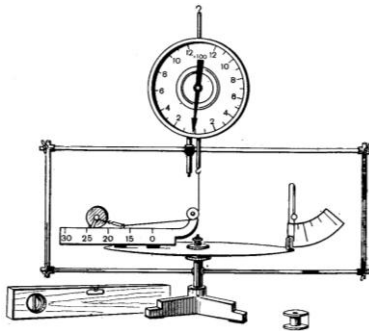
$$|\vec{a}_1| = \frac{|\vec{F}|}{m_1}. \text{ Враховуючи, що сила є векторною величиною, можна}$$

записати  $\vec{F} = m_1 \vec{a}_1$ . Цей вираз не можна розглядати тільки як вираз для визначення сили. Він виражає також закон дії і протидії. Таким чином, сила в механіці – це фізична величина, яку можна визначити як кількісну міру дії тіл одного на друге, в результаті чого ці тіла набувають прискорень.

Залучаючи знання учнів з базового курсу, розглядають питання про одиницю вимірювання сили 1 ньютон (1 Н).

Отже, у процесі формування поняття сили в старшій школі учні повинні засвоїти, що сила є величиною векторною, має точку прикладання, однакові сили надають тілам однакової маси однакових прискорень, рівні за модулем, але протилежно напрямлені сили, прикладені до тіла, прискорення не надають; модуль прискорення тіла під час взаємодії його з іншим тілом може бути визначене за формулою  $|\vec{a}_1| = \frac{m_2}{m_1} |\vec{a}_2|$ .

Вивчення другого закону Ньютона доцільно організувати на основі демонстраційного експерименту. З цією метою дослідним шляхом необхідно встановити залежність між силою, що діє на тіло, масою тіла та прискоренням, якого набуває дане тіло в результаті дії на нього даної сили. Для проведення дослідку найдоцільніше скористатися установкою “Диск обертовий” (мал. 5).



Мал. 5



Привівши диск в обертання, показують, що при одному й тому ж розтязі пружини добуток маси тіла на його прискорення для різних тіл є сталою величиною, тобто при  $F = const$  добуток  $ma = const$ , або ж  $a$  пропорційне до  $\frac{1}{m}$ . Змінюючи частоту

обертання диска, помічають, що прискорення, якого набуває тіло, буде прямо пропорційним до сили, що діє на нього, тобто при  $m = const$  частка  $\frac{F}{a} = const$ , або ж  $a$  пропорційне до  $F$ . На

основі цього роблять висновок, що  $a = \frac{F}{m}$ . Враховуючи вектор-

ний характер прискорення та сили, записують  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$  та форму-

люють другий закон Ньютона: *прискорення, якого набуває тіло масою  $m$  внаслідок дії на нього сили  $F$ , прямо пропорційне цій силі та обернено пропорційне масі тіла.*

Із формули, що виражає другий закон Ньютона, можна зробити висновок, що він справедливий для будь-яких сил у механіці.

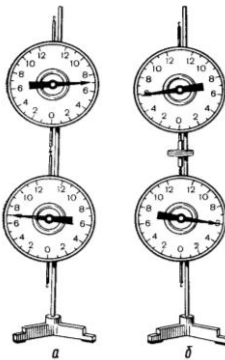
Формула другого закону механіки Ньютона дозволяє встановити одиницю сили – ньютон, яка може бути визначена як сила, що надає тілу масою 1 кг прискорення  $1 \frac{M}{c^2}$ ; ( $1 H = 1 \frac{kg \cdot m}{c^2}$ ).

Вивчення третього закону Ньютона доцільно розпочати з повторення дослідів на взаємодію тіл, звертаючи увагу учнів на те, що кожне з тіл діє на інше з певною силою. Розглядаючи взаємодію тіл під час обертального руху, відоме учням співвідношення  $a_{1x}/a_{2x} = -(m_2/m_1)$  доцільно записати у вигляді  $m_1 \vec{a}_1 = -m_2 \vec{a}_2$ . Оскільки  $m_1 \vec{a}_1 = \vec{F}_1$ , а  $m_2 \vec{a}_2 = \vec{F}_2$ , де  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  – сили, прикладені відповідно до першого та другого тіл, то  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ . Ця рівність і виражає третій закон Ньютона. Є різні формулювання цього закону, але найдоцільніше його сформулювати так: *сили, з*

якими діють тіла одне на одного, діють по одній прямій, рівні за модулем та протилежно напрямлені.

Обов'язково слід звернути увагу учнів на те, що сили, про які йде мова у третьому законі Ньютона, завжди однієї природи. Вони прикладені до різних тіл і тому не мають рівнодійної.

Використовуючи демонстраційні динамометри, учням слід показати на дослідах, що сили завжди виникають парами, тобто, якщо є одна сила, то є й інша, рівна їй за модулем, але протилежно напрямлена (мал. 6).



Мал. 6

Важливим для закріплення знань про закони динаміки Ньютона є розгляд особливостей дії сил різної природи. Розпочати вивчення цього матеріалу доцільно з розгляду гравітаційних сил та закону всесвітнього тяжіння. При вивченні гравітаційних сил передусім обговорюють дослідні факти, які ілюструють дію гравітаційних сил: падіння тіл на Землю, обертання планет навколо Сонця, обертання супутників навколо планет. При цьому звертають увагу учнів на те, що гравітаційні сили проявляються лише як сили притягання тіл, які знаходяться на певній відстані одне від одного.

Закон всесвітнього тяжіння розглядається як узагальнення результатів численних дослідів і явищ природи, зокрема, особливостей руху планет Сонячної системи: *сила взаємодії двох тіл*

пропорційна добутку їх мас та обернено пропорціональна квадрату відстані між ними  $F = G \frac{mM}{R^2}$ .

Далі розкривають фізичний зміст гравітаційної сталої, яка чисельно дорівнює силі притягання між двома тілами, маса кожного з яких дорівнює 1 кг, а відстань між ними 1 м. Важливе значення для розуміння закону є розгляд фундаментальних дослідів Кавендіша з визначення цієї величини. Тут важливо наголосити, що в законі всесвітнього тяжіння маса виступає як міра гравітації, а не міра інертності.

Силу тяжіння (силу, з якою тіла притягуються до Землі) розглядають як частинний випадок сили всесвітнього тяжіння. Сила тяжіння спрямована вертикально вниз і прикладена в точці, яку називають центром тяжіння тіла.

Для з'ясування природи сил пружності розглядається суть явища деформації. При цьому деформація трактується як наслідок того, що прискорення, яких набувають частинки тіл при їх безпосередній взаємодії мають різні значення. Сили пружності виникають внаслідок зміни відстаней між молекулами. Тому вони завжди спрямовані перпендикулярно поверхні дотику тіл і підлягають дії закону Гука:  $F = k\Delta l$ , де  $\Delta l$  – деформація тіла. Математична форма вираження закону Гука дозволяє розраховувати силу пружності за відомою деформацією тіла.

Походження ваги в умовах Землі, як правило, розглядається як результат дії сили тяжіння, внаслідок чого тіло діє на опору, або підвіс, які деформуються.

Слід навчити учнів чітко розрізняти вагу та силу тяжіння і пам'ятати, що ці сили завжди прикладені до різних тіл. Для цього бажано розв'язати декілька графічних задач, які вимагають зображення цих сил. При цьому звертають увагу учнів на те, що вага в умовах Землі має гравітаційне походження але електромагнітну природу. Вага виникає лише внаслідок деформації взаємодіючих тіл. З цього потрібно зробити висновок, що вага не може бути характеристикою даного тіла. Якщо опора чи підвіс нерухомі відносно Землі або рухаються відносно неї прямолінійно і рівномірно, то вага тіла є сталою і дорівнює силі тяжіння

$\vec{P} = m\vec{g}$ . Якщо ж опора чи підвіс рухаються прискорено вгору чи вниз, то вага тіла змінюється (збільшується або зменшується), хоча його маса і сила тяжіння, яка при цьому діє на нього, залишаються сталими. Якщо під час прискореного руху опори чи підвісу з прискоренням вільного падіння вага тіла дорівнює нулю, то такий стан називають невагомістю; якщо ж вага тіла зростає, то такий стан називають перевантаженням.

Завершують розгляд видів сил у механіці вивченням сили тертя. На основі досліду приходять до висновку, що при намаганні зрушити тіло з місця виникає сила, що утримує його на місці. Для цього на стіл кладуть брусок, до гачка якого прикріплюють динамометр, а до динамометра – нитку, перекинуту через блок. До кінця нитки підвішують тягарці так, щоб брусок почав рухатися рівномірно. При цьому динамометр показуватиме значення сили тертя спокою.

Ця сила завжди дорівнює за абсолютним значенням але спрямована протилежно до складової сили, що діє на це тіло паралельно до поверхні стикання тіл. Цю силу називають силою тертя спокою. Далі демонструють учням, що при рівномірному русі бруска покази динамометра залишаються сталими, а це свідчить про те, що сила тертя ковзання у цьому випадку залишається сталою. Вона завжди спрямована проти руху тіла, а її значення пропорційне значенню сили нормального тиску:  $F_m = \mu N$ . Коефіцієнт пропорційності  $\mu$  називають коефіцієнтом тертя ковзання.

Завершується вивчення розділу “Основи динаміки” з’ясуванням питання про застосування законів Ньютона для розв’язання основної задачі механіки. Метою вивчення даного питання є розширення та поглиблення знань учнів про закони руху та сили в природі, формування в них уміння застосовувати набуті знання на практиці. Програмою передбачається розгляд руху тіл під дією сил пружності, тяжіння, тертя, а також рух під дією кількох сил. Особлива увага звертається на вивчення руху тіла під дією сили тяжіння, якщо тіло має певну початкову швидкість, напрямлену під певним кутом до горизонту.

Вивчення даного питання можна розпочати із демонстрації руху цівки води, спрямованої під різними кутами до горизонту, чи руху кульки, кинутої з певною початковою швидкістю. Потім переходять до виведення формул для визначення вертикальної та горизонтальної складової швидкості руху тіла через певний проміжок часу, а також визначення переміщень, що здійснює тіло за цей час у вертикальному та горизонтальному напрямках. При можливості доцільно вивести також і формули для визначення максимальної висоти підйому та дальності польоту тіла, кинутого під кутом до горизонту.

Частинним випадком руху тіла, кинутого під кутом до горизонту, є рух тіла, кинутого горизонтально. Розглядаючи цей рух, приходять до висновку, що далекість польоту тіла може збільшитися як за рахунок початкової швидкості, так і за рахунок кривизни земної поверхні. На основі цих міркувань виводять формулу для розрахунку першої космічної швидкості. Це можна зробити в процесі розв’язування такої задачі: “Визначити, при якій горизонтальній швидкості біля поверхні Землі тіло може стати її штучним супутником”. Вивчення даного питання передбачає широке використання історичного та технічного матеріалу.

Узагальнення знань учнів із теми доцільно провести на заключному уроці. Цей урок проводять у вигляді семінару, до якого учні готують питання:

1. Маса.
2. Сила.
3. Закони Ньютона.
4. Види сил у механіці.

У ході семінару звертається увага учнів на те, що маса характеризує властивості тіл, а сила – явище. Маса є основною, скалярною величиною, а сила – векторною величиною. Одиниця вимірювання маси встановлюється довільно, на основі міжнародної домовленості; одиниця сили визначається, виходячи із рівняння, що виражає зв’язок між силою, масою та прискоренням:

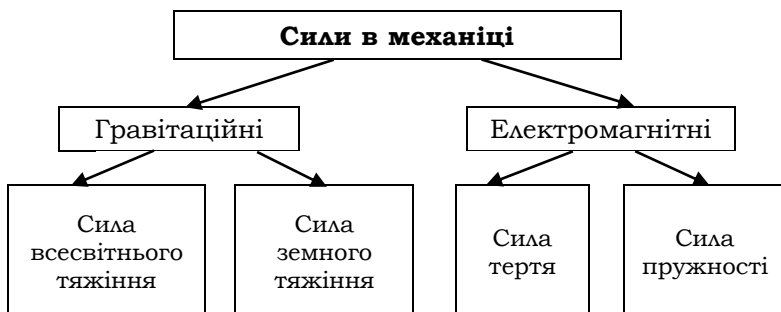
$$\vec{F} = m\vec{a}.$$

Маса в механіці Ньютона інваріантна відносно інерціальних систем відліку; сила не залежить від вибору системи відліку,

оскільки вона є або функцією відстані між взаємодіючими тілами, або функцією відносної швидкості.

Розглядаючи питання про закони Ньютона, наголошують на тому, що вони діють лише в інерціальних системах відліку.

Узагальнюючи знання учнів про види сил у механіці, звертають увагу на те, що ці сили мають або гравітаційну, або електромагнітну природу. З цією метою може бути запропонована наступна структурно-логічна схема:



На завершення уроку розв'язують кілька задач на рух тіла під дією кількох сил (як правило, різного походження).

## 5. Типові задачі

### ►► На перший закон Ньютона

*Чи справедливий закон інерції для системи відліку, пов'язаної з автобусом, який: а) збільшуючи швидкість, відходить від зупинки; б) гальмує, під'їжджаючи до зупинки; в) рухається зі сталою швидкістю на прямолінійній ділянці дороги; г) рухається криволінійною ділянкою дороги.*

### ►► На другий закон Ньютона

*– Дві кульки з отворами зв'язані ниткою і насажені на стрижень, яким вони можуть ковзати з незначним тертям. Яке відношення мас кульок, якщо при їх обертанні вони залишаються в рівновазі, і одна з них знаходиться на відстані 7 см, а інша – на відстані 14 см від осі обертання?*

– З яким прискоренням буде рухатись вагонетка масою 200 кг, якщо на неї буде діяти сила тяги 20 Н? Тертям знехтувати.

►►► **На третій закон Ньютона**

На терезах зрівноважена склянка з водою. Чи порушиться рівновага терезів, якщо у воду занурити олівець і тримати його в руках, не торкаючись склянки? Перевірити відповідь на досліді.

►►► **На закон Гука**

Вантажний автомобіль узяв на буксир легковий, маса якого 2 т, і, рухаючись рівноприскорено, за 50 с проїхав 400 м. На скільки видовжився при цьому трос, яким з'єднано автомобілі, якщо його жорсткість  $2 \cdot 10^6 \frac{H}{m}$ . Тертя не враховувати.

►►► **На закон всесвітнього тяжіння**

Обчислити, з якою силою Земля притягується Сонцем.

►►► **На рух тіл під дією сили тяжіння**

Обчислити дальність польоту та висоту підйому тіла, кинутого під кутом  $30^\circ$  до горизонту з початковою швидкістю  $20 \frac{m}{s}$ ).

►►► **На обчислення ваги**

Визначити силу тиску лижника на сніг на середині випуклої та середині вгнутої ділянок дороги, якщо маса лижника 70 кг, його швидкість  $20 \frac{m}{s}$ , а радіус кривизни ділянок дороги 80 м.

►►► **На рух штучних супутників та планет**

Яку швидкість повинен мати штучний супутник, щоб обертатися коловою орбітою на висоті 600 км над поверхнею Землі? Який період його обертання?

►►► **На рух тіл під дією сили тертя.**

Чи зможе автомобіль проїхати горизонтальну криволінійну ділянку дороги зі швидкістю  $72 \frac{km}{год}$ , якщо радіус кривизни цієї ділянки 25 м, а коефіцієнт тертя становить 0,4?

**►► На рух тіл під дією кількох сил**

Яку силу тяги розвиває двигун автомобіля масою 2 т, якщо він рухається на підйом, висота якого 5 м, а довжина 100 м з прискоренням  $0,2 \frac{M}{c^2}$ ? Коефіцієнт опору рухові становить 0,03.

**6. Організація контролю і обліку знань учнів**

Сформованість знань і вмій учнів із даної теми доцільно перевірити у процесі проведення таких форм контролю: самостійні роботи необхідно провести після вивчення другого закону Ньютона, першої космічної швидкості, руху під дією сили тертя, руху зв'язаних тіл; фізичні диктанти – після вивчення розділів “Законо Ньютона” та “Сили в механіці”; контрольні роботи – після вивчення розділу “Сили в механіці” (включивши до контрольної роботи також матеріал попереднього розділу “Законо Ньютона”) та наприкінці теми.

**Питання для самоконтролю**

1. Який зміст теми “Основи динаміки”?
2. Які поняття вивчаються в даній темі?
3. Які демонстрації та лабораторні роботи передбачаються програмою при вивченні даної теми?
4. Які особливості введення поняття маси?
5. На основі яких дослідів можна організувати вивчення другого закону Ньютона?
6. Які сили вивчаються в механіці?
7. Яка послідовність вивчення питання про силу тертя?
8. Які випадки руху під дією кількох сил вивчають у темі “Основи динаміки”?



---

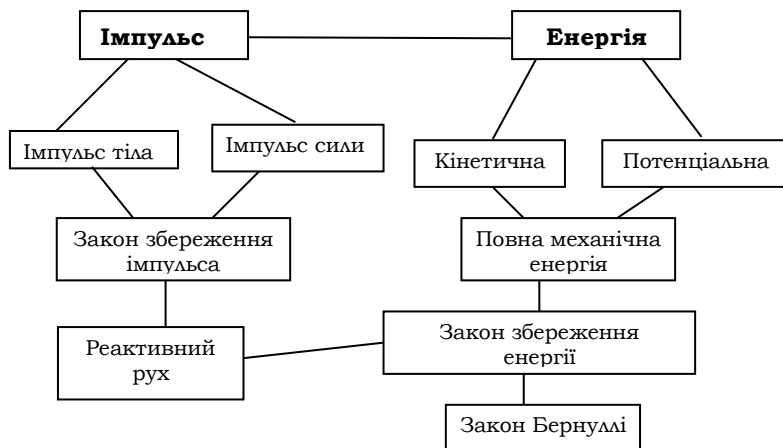
**Лекція 3.**  
**Методика вивчення теми**  
**“ЗАКОНИ ЗБЕРЕЖЕННЯ”**

**1. Науково-методичний аналіз змісту  
та структури теми**

Розглядом теми “Закони збереження” завершується вивчення механіки. Ця тема складається із трьох частин: “Закон збереження імпульсу”, “Закон збереження енергії” та “Рух у рідинах і газах”, причому остання частина присвячена питанням практичного використання законів збереження. У першій частині передбачається формування поняття про імпульс тіла та закон збереження імпульсу. На основі закону збереження імпульсу пояснюється рух ракети. У другій частині вводиться поняття механічної роботи, потенціальної та кінетичної енергії тіла, вивчається закон збереження енергії в механічних системах. У заключній частині розглядаються основні положення гідроаеродинаміки: залежність тиску рідини від швидкості її течії та підймальна сила крила літака.

Вивчення теми вимагає доброго володіння учнями математичним апаратом, передбачає широке використання демонстраційного та лабораторного експерименту, тісний зв'язок із курсом фізики основної школи, де учні вже вивчали механічну роботу, а також ознайомились із поняттями тиску та тертя. Значна увага приділяється прикладному значенню даної теми та висвітленню питань про внесок вітчизняних учених у розвиток космонавтики та авіації. Матеріал теми знаходить широке використання при вивченні подальших розділів шкільного курсу фізики.

### Структурно-логічна схема теми “ЗАКОНИ ЗБЕРЕЖЕННЯ”



## 2. Основні поняття теми та їх науково-методичний аналіз

Основними поняттями, які використовуються при вивченні закону збереження імпульсу, є поняття імпульсу, механічної системи, замкненої механічної системи, зовнішніх, внутрішніх та консервативних сил.

*Імпульсом*, або *кількістю руху* тіла називають фізичну величину, яка дорівнює добутку маси тіла на його швидкість:  $m\vec{v}$ . Імпульс тіла є векторною величиною, а його напрямок співпадає з напрямком швидкості тіла. Таким чином, імпульс має будь-яке тіло, що рухається в даній системі відліку з певною швидкістю. Оскільки швидкість тіла є відносною (залежить від вибору системи відліку), то імпульс тіла також буде залежати від

вибору системи відліку. Якщо під час руху тіла його швидкість змінюється, то змінюється й імпульс тіла. У такому разі говорять про зміну імпульсу тіла  $\Delta m\vec{v} = m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1$ . Зміна імпульсу тіла не залежить від вибору системи відліку. Одиницею імпульсу (зміни імпульсу) є кілограм-метр за секунду  $\left(\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}\right)$ .

Під **системою** розуміють множину елементів, що взаємодіють між собою та утворюють певну цілісність. Механічну систему утворюють сукупність матеріальних точок чи тіл, які розглядаються разом. Якщо тіла, що утворюють механічну систему, взаємодіють тільки між собою (існують тільки внутрішні сили), то така система є замкненою. Останнє поняття є ідеалізацією, оскільки неможливо створити умови, за яких тіла, що утворюють механічну систему, взаємодіяли б тільки між собою і не взаємодіяли з тілами, які не входять у цю систему. Але за певних умов силами, що діють на тіла механічної системи з боку інших тіл (зовнішніми силами), можна знехтувати, або ж ці сили компенсуються. У такому випадку механічну систему можна також вважати замкненою.

Іншим важливим поняттям даної теми є **консервативні (потенціальні) сили**, тобто сили, робота яких залежить тільки від початкового і кінцевого положення точки їх прикладання і не залежить ні від виду траєкторії цієї точки, ні від закону її руху. Робота таких сил уздовж довільної замкненої траєкторії завжди дорівнює нулю. У механіці такою силою є сила тяжіння.

Під час вивчення закону збереження механічної енергії широко використовуються поняття роботи, енергії, потенціальної та кінетичної енергії.

Вичерпного означення поняття **роботи** не існує. Часто користуються формально-математичним визначенням цього поняття: робота, що виконується сталою силою, дорівнює добутку абсолютних значень сили та переміщення, помноженому на косинус кута між векторами сили та переміщення  $A = |\vec{F}| \cdot |\vec{s}| \cos \alpha$ . Робота є скалярною величиною, але вона може бути як додат-

ною, так і від'ємною. Коли напрям сили і напрям переміщення збігаються, то робота вважається додатною. Робота, що виконується силою, спрямованою протилежно переміщенню тіла, є від'ємною. У останньому випадку кажуть, що виконується робота проти цієї сили. Коли до рухомого тіла прикладено кілька сил, то кожна з них виконує роботу, а загальна робота всіх сил дорівнює алгебраїчній сумі робіт, що виконуються окремими силами. Залежність роботи від переміщення зумовила відносний характер роботи (залежність її величини від вибору системи відліку). Одиницею вимірювання роботи є джоуль (*Дж*).

Існують різні визначення поняття *енергії*. Враховуючи, що є різні види руху матерії, які перетворюються один в одного в строго визначених кількостях, виникає можливість виміряти різні види руху матерії деякою загальною мірою. Тому енергію можна визначити як загальну, єдину кількісну міру різних форм руху матерії. З іншого боку, кожному певному стану механічної системи відповідає певна енергія. Перехід із одного стану в інший супроводжується зміною енергії системи. У випадку механічних процесів цей перехід здійснюється в процесі виконання механічної роботи. Тому енергія системи – це функція її стану. У шкільному курсі фізики енергія найчастіше визначається як фізична величина, що визначає здатність тіл виконувати роботу. Кожне із наведених визначень поняття енергії не є бездоганним ні в науковому, ні в методичному плані. Зокрема, останнє з них передбачає попереднє ознайомлення школярів з поняттям роботи. Але фізичний зміст поняття роботи може бути розкритий лише через поняття енергії.

У механіці розглядають кінетичну та потенціальну енергію. Під *кінетичною енергією* тіла масою  $m$ , яке рухається із швидкістю  $v$ , розуміють фізичну величину, яка чисельно дорівнює  $\frac{mv^2}{2}$ . Отже, кінетична енергія характеризує рухоме тіло.

Ця величина є скалярною, а її значення залежить від вибору системи відліку. Якщо на рухоме тіло діє сила, а отже швидкість його змінюється, то зміна кінетичної енергії тіла дорівнює робо-

ті, виконаній силою, що діє на тіло:  $A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$ . Це твердження носить назву теореми про кінетичну енергію.

**Потенціальна енергія** – це частина енергії механічної системи, що залежить від її конфігурації, тобто від взаємного розташування частин системи та їх положення в зовнішньому силовому полі. Таким чином, потенціальна енергія є функцією стану.

**Потенціальною енергією** тіла масою  $m$ , на яке діє сила тяжіння, піднятого на висоту  $h$  над нульовим рівнем називають величину  $m|\vec{g}|h$ . Зміна потенціальної енергії такого тіла, взята з протилежним знаком, дорівнює роботі, виконаній силою тяжіння:  $A = -(m|\vec{g}|h_2 - m|\vec{g}|h_1)$ . Значення цієї енергії залежить від вибору нульового рівня.

Потенціальною енергією пружно деформованого тіла називають фізичну величину, зміна якої, взята з протилежним знаком, дорівнює роботі, виконаній силою пружності:

$$A = -\left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right). \text{ Енергія, як і робота, вимірюється в джоулях.}$$

Таким чином, поняття роботи та енергії – дуже близькі, але їх необхідно розрізняти. Робота характеризує процес, а енергія – стан механічної системи. Тому доцільно говорити про енергію тіла, але не можна говорити про кількість роботи. Термін “робота” може використовуватись у двох розуміннях: робота – процес переміщення тіла під дією сили; робота – фізична величина, що характеризує цей процес і є мірою зміни енергії.

### 3. Навчальний фізичний експеримент

#### Демонстрації

Закон збереження імпульсу [27, с. 121; 9, с. 80]. Реактивний рух [27, с. 124; 9, с. 82]. Перехід потенціальної енергії в кінетичну і навпаки [27, с. 128; 9, с. 84]. Зміна енергії тіла при

виконанні роботи (9, с. 85). Залежність тиску рідини від швидкості її течії [27, с. 132; 9, с. 87]. Будова і дія пульверизатора та водоструминного насоса (9, с. 89; 27, с. 45). Підймальна сила крила літака [27, с. 136; 9, с. 96]. Принцип дії вітряного двигуна [27, с. 138].

### Лабораторні роботи

“Вивчення закону збереження механічної енергії”. При поглибленому вивченні фізики додатково можуть бути виконані лабораторні роботи: “Розрахунок і вимірювання швидкості кулі й циліндра, що скочуються з похилої площини”, “Визначення ККД простих механізмів і машин”, “Порівняння роботи сили і зміни кінетичної енергії”.

### 4. Методика вивчення основних питань теми

Вивчення питання про імпульс тіла доцільно розпочати з повідомлення учням того факту, що знання законів Ньютона не дає можливості розв’язати деякі задачі механіки, тому необхідно знайти інші шляхи розв’язання таких задач. Після цього можна запропонувати учням записати формулу другого закону Ньютона  $\vec{F} = m\vec{a}$  та прискорення  $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$ , з яких шляхом несклад-

них перетворень отримати нову формулу  $\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0$ . Повідомляють учням, що величину  $m\vec{v}$  називають імпульсом тіла. Фізичний зміст імпульсу полягає в тому, що при даних значеннях добутку сили на час її дії зміна імпульсу всіх тіл, на які діє сила, однакова. Імпульс тіла є відносною величиною, тобто, залежить від вибору системи відліку. Звертають увагу учнів на те, що зміни імпульсу тіла можна досягнути різними способами: діючи великою силою протягом малого проміжку часу, або ж діючи невеликою силою протягом великого проміжку часу.

Ця величина має дуже важливе значення не тільки в механіці, але й у інших розділах фізики. Оскільки швидкість є векторною величиною, а маса – скалярною, то імпульс тіла є

величиною векторною, співнапрявленою з вектором швидкості тіла. Одиницею імпульсу є  $1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ .

На основі формули  $\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0$  вводять поняття імпульсу сили – добутку сили на час її дії. Якщо сила не є сталою величиною, то цю формулу можна застосовувати лише для таких малих проміжків часу, протягом яких сила істотно не змінюється ні за модулем, ні за напрямком. При великій зміні сили цією формулою також можна користуватися, але тоді беруть середнє значення сили за певний проміжок часу.

Вивчення закону збереження імпульсу можна розпочати з розповіді учням про те, що цей закон був відкритий французьким ученим Декартом, суттєво уточнений у 1668 році голландським фізиком Гюйгенсом, а остаточно обґрунтований Ньютоном у 1688 році у трактаті “Математичні початки натуральної філософії”. Вивести формулу закону збереження імпульсу тіла можна на основі формули третього закону Ньютона. У результаті цього отримують вираз  $m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}'_1 + m_2\vec{v}'_2$ . Це означає, що в замкненій механічній системі загальний імпульс тіл не змінюється при їх взаємодії, отже, під дією тільки внутрішніх сил система не може змінити свій стан. Для експериментального підтвердження закону збереження імпульсу учням можна продемонструвати досліди з двома візочками, які можна вважати замкненою системою [9, с. 80].

Під час вивчення закону збереження імпульсу важливо звернути увагу учнів на те, що він має певні межі застосування. Він виконується в будь-якій інерціальній системі відліку, оскільки він є наслідком із другого та третього законів Ньютона. Незважаючи на те, що закон збереження імпульсу діє в замкнених механічних системах, на практиці з певним наближенням його можна використовувати також і для систем, які не є замкненими. Це можливо у випадках, коли зовнішні сили, що діють на кожне із тіл системи, зрівноважуються, або ж вони значно менші від внутрішніх сил системи і їх дією можна знехтува-

ти. Можливий також випадок, коли проекції всіх зовнішніх сил на певний напрямок дорівнюють нулю (зовнішні сили перпендикулярні до цього напрямку). У такому напрямку система вважається замкнутою, і закон збереження імпульсу можна застосовувати до проекцій імпульсів тіл на цей напрямок.

Під час вивчення даної теми значна увага приділяється питанням практичного використання закону збереження імпульсу в техніці, та його прояву в природі. На основі закону збереження імпульсу вивчається реактивний рух та принцип дії двигуна ракети.

Вивчення питання про механічну роботу в старшій школі повинне базуватися на тих знаннях про цю величину, які учні одержали в базовому курсі. На основі цього з'ясовуються умови, за яких здійснюється робота (дія сили та переміщення тіла під дією цієї сили), розглядається формула для визначення роботи для випадку, коли напрямок дії сили співпадає з напрямком руху тіла.

У старшій школі відбувається розширення поняття механічної роботи. Учні ознайомлюються із формулою роботи  $A = |\vec{F}| \cdot |\vec{s}| \cos \alpha$ . Розглядаючи частинні випадки для різних значень кута  $\alpha$ , в учнів формують поняття про додатну та від'ємну роботу. Використовуючи формулу  $A = |\vec{F}| \cdot |\vec{s}| \cos \alpha$ , виводять вирази для обчислення роботи всіх видів сил у механіці:

$A = mgh$  – робота сили тяжіння;  $A = \frac{k(x_1^2 - x_2^2)}{2}$  – робота сили

пружності;  $A = -F_m l$  – робота сили тертя. На конкретних прикладах доцільно переконати учнів у тому, що значення механічної роботи має відносний характер (залежить від вибору системи відліку). З цією метою учням можна запропонувати розв'язати наступну задачу.

*Пасажир переміщує вантаж на відстань 2 м по підлозі вагона, який рухається прямолінійно рівномірно, приклавши до вантажу силу 50 Н, спрямовану в бік руху потяга. Яку роботу виконав пасажир, переміщуючи вантаж, в системі відліку,*



пов'язаній із землею, та в системі відліку, пов'язаній із вагоном, якщо вагон за час переміщення вантажу пройшов відстань 10 м?

Формування поняття енергії розпочинають із повторення відомостей про цю величину, відомих учням із базового курсу. Учні вже знають, що тіло має механічну енергію, якщо воно здатне здійснити роботу. У старшій школі це поняття необхідно розвинути та сформувані в учнів уявлення про те, що енергія є фізичною величиною, яка залежить від стану тіла, а її зміну під час переходу з одного стану в інший визначають числовим значенням виконаної роботи.

Поняття про кінетичну енергію формують, розглядаючи прискорений рух тіла, тобто рух, при якому відбувається зміна швидкості тіла. При цьому встановлюють зв'язок роботи із зміною швидкості тіла. Використовуючи формули  $A = |\vec{F}| \cdot |\vec{s}| \cos \alpha$ ,

$$F = ma \text{ та } s = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a}, \text{ одержують, що } A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

Звертають увагу учнів на те, що обидва доданки в правій частині мають однаковий вигляд і виражаються половиною добутку маси тіла на квадрат його швидкості. Цю величину називають

кінетичною енергією та позначають  $E_k = \frac{mv^2}{2}$ . Тоді вираз для

роботи можна записати у вигляді  $A = E_{k2} - E_{k1}$ . У правій частині цього виразу мають зміну кінетичної енергії, тобто робота сили, що діє на тіло, дорівнює зміні його кінетичної енергії. Це твердження називають теоремою про кінетичну енергію. На завершення проводять аналіз формули, що виражає теорему про кінетичну енергію тіла, для випадків, коли  $v_2 = 0$ ;  $v_1 = 0$ ;  $v_2 > v_1$ ;

$v_2 < v_1$ .

Аналізуючи формулу  $E_k = \frac{mv^2}{2}$ , роблять висновок, що кінетична енергія тіла сталої маси залежить від його швидкості, а отже, є функцією швидкості. Це положення підтверджують від-

повідними дослідами. Звертають увагу учнів на відносність значень кінетичної енергії, тобто залежність її значення від вибору системи відліку. Отже, кінетична енергія – величина відносна.

При вивченні потенціальної енергії учні повинні засвоїти, що потенціальна енергія – це енергія взаємодії щонайменше двох тіл. Тому потенціальна енергія відноситься до системи тіл, а не до одного ізолюваного тіла.

Формуючи поняття потенціальної енергії тіла, піднятого на певну висоту над поверхнею Землі, розглядають роботу сили тяжіння при підйманні тіла з висоти  $h_1$  на висоту  $h_2$ . Ця робота

буде дорівнювати  $A = m|\vec{g}|(h_1 - h_2)$ . Розкривши дужки та переставивши доданки, одержують вираз  $A = -(m|\vec{g}|h_2 - m|\vec{g}|h_1)$ . Звертають увагу учнів на те, що робота сили тяжіння дорівнює

взятій з протилежним знаком зміні величини, яка дорівнює добутку маси тіла, модуля прискорення вільного падіння та висоти, на яку піднято тіло. Нагадують, що раніше було доведено, що робота дорівнює зміні величини  $\frac{mv^2}{2}$ , яку назвали кінетичною енергією. Тому величину  $m|\vec{g}|h$ , зміна якої, взята з протилежним знаком, також дорівнює роботі, називають потенціальною енергією. Отже,  $m|\vec{g}|h$  – це потенціальна енергія тіла, що знаходиться в полі тяжіння і піднятого на висоту  $h$  над нульовим рівнем. Позначивши  $m|\vec{g}|h = E_p$ , можна записати

$A = -(E_{p2} - E_{p1})$ .

Звертають увагу учнів на те, що потенціальна енергія тіла, піднятого на певну висоту над поверхнею землі, залежить від координати  $h$ , тобто є функцією висоти. Причому висота визначається відносно нульового рівня, який можна вибрати довільно. Тому значення потенціальної енергії буде залежати від вибору нульового рівня. (Кінетична енергія залежить від швидкості тіла, тобто є функцією стану руху тіла). Отже, і кінетична, і потенціальна енергія тіла є функціями стану тіла.

При вивченні роботи сили пружності та енергії пружно деформованого тіла спочатку пригадують закон Гука  $F_{np.} = -kx$ . Але під час деформації тіла сила пружності змінюється, тому, обчислюючи роботу, необхідно брати середнє значення сили пружності, яке знаходять за формулою  $|\vec{F}_{np.c.}| = k \frac{x_1 + x_2}{2}$ . Модуль переміщення дорівнює різниці  $x_1 - x_2$ . Після цього одержують формулу для визначення роботи під час деформації тіла  $A = \frac{k}{2}(x_1^2 - x_2^2)$ , або ж  $A = -\frac{k}{2}(x_2^2 - x_1^2)$ . Проводять аналіз одержаної формули, обчислюючи роботу для випадків, коли  $x_2 = 0$ , але  $x_1 > 0$  та  $x_1 = 0$ , але  $x_2 > 0$ . У результаті аналізу приходять до висновку, що робота сили пружності завжди додатна.

Доцільно також порівняти формули для роботи сили тяжіння та роботи сили пружності:  $A = m|\vec{g}|(h_1 - h_2)$  і  $A = \frac{k}{2}(x_1^2 - x_2^2)$ , на основі чого зробити висновок, що робота сили пружності та сили тяжіння залежать тільки від початкового та кінцевого положення тіла і не залежать від форми та довжини траєкторії, якою вони рухаються.

Після цього розглядають питання про енергію пружно деформованого тіла та зв'язок зміни енергії такого тіла з виконаною під час його деформації роботою. У результаті цього одержують формулу  $A = -\left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right)$ . Порівнюють цю формулу з відповідними виразами для потенціальної та кінетичної енергії тіла. Роблять висновок, що енергія є функцією стану тіла, а робота в усіх випадках дорівнює зміні енергії тіла.

При вивченні роботи сили тертя звертають увагу учнів на те, що ця робота є від'ємною, оскільки сила тертя спрямована в бік, протилежний руху. Повна робота сили тертя на замкненому шляху (на відміну від роботи сил тяжіння та пружності) не дорі-

вноє нулю, а дорівнює добутку модуля сили на пройдений шлях, взятому із знаком “мінус”.

Закон збереження енергії розглядають на основі теорем про кінетичну  $A = E_{k2} - E_{k1}$  та потенціальну  $A = -(E_{p2} - E_{p1})$  енергії тіла. При цьому звертають увагу учнів на те, що при виконанні роботи збільшення кінетичної енергії супроводжується зменшенням потенціальної енергії тіла (і навпаки), та формулюють закон збереження механічної енергії для замкнених систем: у замкненій системі, де діють лише електромагнітні та гравітаційні сили, сума потенціальної та кінетичної енергії тіла є сталою величиною, тобто  $E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}$ .

Окремо слід зупинитися на розгляді закону збереження енергії при наявності сили тертя. Робота сил тертя спричинює зменшення кінетичної енергії системи. Але при цьому потенціальна енергія не збільшується, як це відбувається при дії сил тяжіння та пружності.

При вивченні закону збереження енергії значну увагу приділяють питанню методики розв’язування задач з даної теми.

Завершують вивчення теми розглядом застосування закону збереження енергії до пояснення роботи простих механізмів, виведення закону Бернуллі, пояснення походження підйимальної сили крила літака. При розгляді останнього питання розкриваються широкі можливості для ознайомлення учнів із історією авіації та розвитком літакобудування в Україні.

Урок узагальнення знань учнів із даної теми можна провести у вигляді семінарсько-практичного заняття, на яке учням пропонують підготувати відповіді на наступні питання:

1. Імпульс тіла та закон збереження імпульсу.
2. Робота та енергія.
3. Закон збереження механічної енергії.

У процесі систематизації знань учнів про механічну роботу доцільно заповнити та проаналізувати разом з учнями наступну таблицю:

Види механічної роботи	Формула для обчислення роботи	Особливості цього виду роботи
Робота сили тяжіння	$A = m \vec{g} (h_1 - h_2)$	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Не залежить від довжини та форми шляху, пройденого тілом.</li> <li>2) Завжди дорівнює добутку сили тяжіння на різницю висот у початковому та кінцевому положеннях.</li> <li>3) Повна робота під час руху тіла по замкнутому контуру дорівнює нулю.</li> </ol>
Робота сили пружності	$A = \frac{k}{2}(x_1^2 - x_2^2)$	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Залежить від початкового та кінцевого положень тіла.</li> <li>2) Дорівнює половині добутку жорсткості пружного тіла на різницю квадратів його початкової та кінцевої деформацій.</li> <li>3) Повна робота під час руху “туди й назад” дорівнює нулю.</li> </ol>
Робота сили тертя	$A = - F_m l$	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Дорівнює добутку модуля сили на довжину шляху, пройденого тілом.</li> <li>2) Від’ємна, оскільки сила тертя спрямована в бік, протилежний руху тіла.</li> <li>3) Залежить від довжини шляху, пройденого тілом.</li> </ol>

З метою узагальнення знань учнів про енергію можна разом з учнями заповнити та проаналізувати таку таблицю:

Вид (назва) механічної енергії	Визначення	Формула для визначення даного виду енергії	Особливості виду енергії	Зв'язок роботи із зміною енергії
Кінетична	Енергія, обумовлена рухом тіла	$E_k = \frac{mv^2}{2}$	Дорівнює максимальній роботі, яку може виконати тіло при повному гальмуванні	$A = E_{k2} - E_{k1} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$
Потенціальна: а) тіла, піднятого над Землею; б) пружно деформованого тіла	Енергія, обумовлена взаємодією тіл або частин тіла	$E_p = m \vec{g} h$ $E_p = \frac{kx^2}{2}$	Дорівнює всій роботі, яка може бути виконана під час переходу системи на нульовий рівень	$A = -(E_{p2} - E_{p1}) = -(m \vec{g} h_2 - m \vec{g} h_1)$ $A = -\left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right)$

Завершують урок узагальнення знань з даної теми розв'язуванням експериментальних задач на використання законів збереження механічної енергії та імпульсу тіла.

## 5. Типові задачі

Під час вивчення даної теми розв'язуються задачі наступних типів.

### ►► На обчислення імпульсу, зміни імпульсу та імпульсу сили

Молекула масою  $m = 4,65 \cdot 10^{-26}$  кг, що рухається із швидкістю  $v = 600 \frac{m}{c}$ , вдаряється і пружно відскакує від стінки посудини. Знайти зміну імпульсу молекули та імпульс сили, який одержала стінка, якщо молекула летить і відскакує: а) перпендикулярно; б) під кутом  $30^\circ$  до стінки).

### ►► На закон збереження імпульсу

Людина масою 80 кг стрибає в напрямку, перпендикулярному до берега, на пліт масою 300 кг, який пливе за течією. З якою швидкістю та в якому напрямку буде рухатися пліт, якщо швидкість течії  $1 \frac{m}{c}$ , а швидкість руху людини  $7 \frac{m}{c}$ ? Опором води знехтувати.

### ►► На обчислення роботи

Людина іде берегом і тягне на тросі проти течії човен. Сила натягу троса 150 Н. Кут між тросом і берегом  $30^\circ$ . Яку роботу виконає людина на шляху 1 км?

### ►► На механічну енергію

– М'яч масою 0,1 кг вільно падає з висоти 10 м. Визначити потенціальну та кінетичну енергію м'яча на початку та в кінці падіння, а також на відстані 4 м від поверхні Землі.

– Артист цирку масою 60 кг стрибає з висоти 10 м на розтягнуту сітку. З якою середньою силою він діє на сітку, якщо вона прогинається на 1 м?

– Щоб розтягнути пружину на 4 мм, треба виконати роботу 0,02 Дж. Яку роботу треба виконати, щоб розтягнути цю саму пружину на 4 см?

### ► На закон збереження енергії

– Які значення потенціальної та кінетичної енергії стріли масою 50 г, випущеної з лука зі швидкістю  $30 \frac{m}{c}$  вертикально вгору, через 2 с після початку руху?

– З якою швидкістю рухався поїзд масою 1500 т, якщо під дією гальмівної сили в 150 кН він пройшов з моменту початку гальмування до зупинки шлях 500 м?

## 6. Організація контролю і обліку знань учнів

Перевірку сформованості знання закону збереження імпульсу та вміння використовувати його до розв’язування задач доцільно провести в процесі написання самостійної роботи після вивчення цього питання. Другу самостійну роботу пропонують учням після вивчення понять роботи та енергії, а також закону збереження механічної енергії, включивши до неї розрахункові задачі на відповідний матеріал. Фізичний диктант проводять після вивчення закону збереження механічної енергії, включивши в нього і матеріал про імпульс. Після вивчення всієї теми проводять контрольну роботу.



### Питання для самоконтролю

1. Який зміст теми “Закони збереження”?
2. Які основні поняття даної теми?
3. Як можна обґрунтувати доцільність введення поняття імпульсу?
4. Із чого доцільно розпочати вивчення закону збереження імпульсу?
5. Як вводиться поняття механічної роботи?
6. Які особливості формування поняття про потенціальну енергію тіла?
7. Як вводиться закон збереження механічної енергії?
8. Задачі яких типів розв’язуються у темі “Закони збереження”?



---

## Розділ II

# МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА

### Лекція 4.

#### Методика вивчення теми “ОСНОВИ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ”

##### 1. Науково-методичний аналіз змісту і структури теми

Тема є частиною розділу шкільного курсу фізики “Молекулярна фізика”.

У програмі [34] зміст теми викладено наступним чином.

Основи молекулярно-кінетичної теорії та її дослідне обґрунтування. Дослід Штерна. Броунівський рух. Маса і розміри молекул. Взаємодія атомів і молекул речовин у різних агрегатних станах.

Ідеальний газ. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу. Температура та її вимірювання. Швидкість молекул ідеального газу.

Рівняння Менделєєва-Клапейрона. Ізопроцеси в газах.

Насичена й ненасичена пара. Залежність температури кипіння рідини від тиску. Вологість повітря та її вимірювання. Точка роси.

Властивості поверхні рідини. Поверхневий натяг. Змочування. Капілярні явища. Явища змочування і капілярності в живій природі і техніці.

Кристалічні й аморфні тіла. Природне й штучне утворення кристалів. Поняття про рідкі кристали. Механічні властивості твердих тіл і матеріалів: пружність, міцність, пластичність. Види деформацій. Створення матеріалів із заданими фізичними властивостями.

У темі можна виділити дві великі групи питань.

1. Основи МКТ (основні відомості про молекули, їх рух та взаємодію, основне рівняння МКТ ідеального газу, температура, рівняння Менделєєва-Клапейрона).

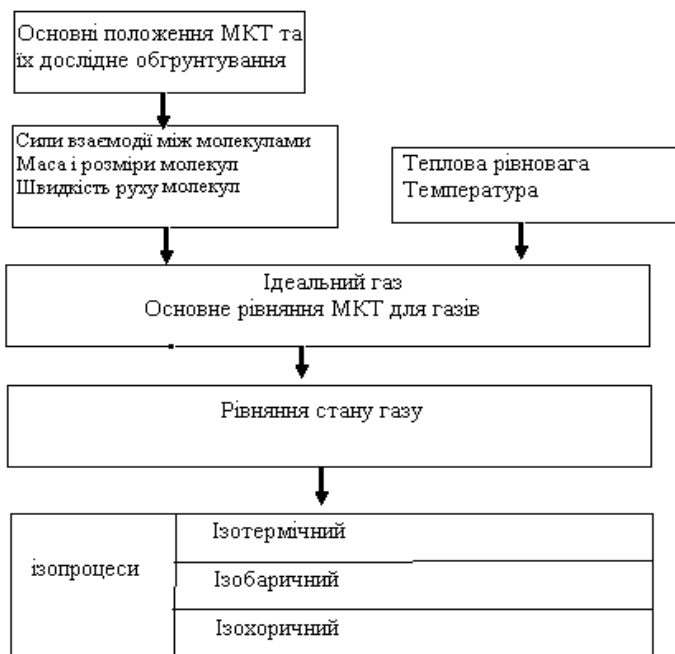
2. Властивості пари, поверхні рідини, твердих тіл.

У такому порядку, як рекомендує програма, викладено матеріал у підручнику С.У. Гончаренка [6]. У підручнику Є.В. Коршака та ін. [17] після викладу першої групи питань іде тема “Основи термодинаміки”, а потім викладається друга група питань. У підручнику С.У. Гончаренка прийнятий дедуктивний метод вивчення газових законів. Спочатку подається основне рівняння МКТ ідеального газу, далі рівняння стану газу, а потім – газові закони як окремі випадки рівняння стану газу.

У підручнику Є.В. Коршака та ін. прийнято індуктивний метод вивчення. Спочатку розглядаються закони Бойля-Маріотта та Гей-Люссака, далі після введення абсолютної шкали температур – рівняння стану ідеального газу; потім – закон Шарля як окремий випадок рівняння стану газу і, нарешті, основне рівняння МКТ ідеального газу.

Аналіз позитивних та негативних сторін індуктивного та дедуктивного методів вивчення газових законів проведено у кількох посібниках з методики фізики, зокрема у посібнику [30].

Структурно-логічна схема теми [6] може бути подана такою:



Молекулярна фізика як розділ шкільного курсу фізики вивчає механічні і теплові властивості тіл залежно від їх будови, сил взаємодії між частинками речовини і характеру їх теплового руху. У цьому розділі вивчаються агрегатні стани речовини та фазові переходи, а також явища на межі між речовинами, що перебувають у різних агрегатних станах. У термодинаміці вивчаються взаємні перетворення різних видів енергії, пов'язані з кількістю теплоти і роботою.

Особливості розділу “Молекулярна фізика” полягають у тому, що в ньому вивчається поведінка якісно нового матеріального об’єкта, а саме, системи, яка складається з величезної кількості частинок (атомів, молекул) і нова, притаманна лише цьому об’єкту, форма руху – теплова. Це обумовлює необхідність введення для опису молекулярних явищ нових фізичних понять, не властивих механіці, а саме: температура, внутрішня енергія, середня квадратична швидкість молекул, тепла рівновага та ін. У поведінці нового об’єкта з властивою йому новою формою руху проявляються нові закономірності – статистичні, на відміну від механіки, де розглядалися динамічні закономірності. На основі статистичних уявлень можна зрозуміти суть необоротності теплових явищ.

Законами механіки неможливо описати хаотичність теплового молекулярного руху, тому в МКТ (молекулярно-кінетичній теорії) кількісні закономірності встановлюються на основі статистичного методу, який для опису теплового руху використовує імовірно-статистичні поняття. Ці поняття не вивчаються у загальноосвітній школі через їх складність, тому в школі розглядають лише середні значення величин, що описують певну сукупність молекул. Середні значення швидкостей руху частинок, їх енергій та інших характеристик визначають властивості макроскопічної системи як цілого.

Велика кількість властивостей макроскопічних систем описується термодинамічним методом. У цьому методі не враховується будова речовини, а її властивості вивчаються на основі аналізу умов та кількісних співвідношень при перетворенні енергії у розглядуваних системах.

Обидва методи дослідження – термодинамічний і статистичний – описують властивості речовини з різних точок зору і доповнюють один одного.

Усе розглянуте вище визначає світоглядне значення вивчення молекулярної фізики. При її вивченні поглиблюється поняття матерії та форм її руху, розглядаються нові закономірності та методи вивчення явищ тощо.

Вивчення розділу має велике політехнічне значення. Молекулярна фізика є науковою основою матеріалознавства, що дозволяє на основі знань про внутрішню будову речовини створювати матеріали із заздалегідь заданими властивостями. Вивчення теплових явищ знайомить учнів з основами теплоенергетики, принципами роботи теплових двигунів, екологічними проблемами.

## 2. Основні поняття та їх науково-методичний аналіз

Для вивчення багатьох явищ у газах користуються спрощеною моделлю газу, а саме: нехтують формою молекул і вважають їх кульками дуже малих розмірів і не враховують взаємодію молекул на відстані. Цю спрощену модель називають ідеальним газом. Реальні гази при невеликих тисках і не дуже малих температурах ведуть себе як ідеальні.

Для вимірювання маси атомів чи молекул зручно користуватися позасистемною одиницею – атомною одиницею маси.

За **атомну одиницю маси** приймають  $1/12$  маси атома ізотопу Карбону  $^{12}\text{C}$ .

$$1 \text{ а.о.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

**Відносною молекулярною масою** речовини  $M_r$  називають відношення маси молекули  $m_0$  даної речовини до  $1/12$  маси атома Карбона  $m_c$ :

$$M_r = \frac{m_0}{1/12 m_c}.$$

**Кількістю речовини** називається відношення кількості молекул  $N$  у даному тілі до кількості атомів  $N_A$  в  $0,012$  кг вуглецю:

$$\nu = \frac{N}{N_A}.$$

Одиницею кількості речовини є моль.

**Моль** – це така кількість речовини, яка містить стільки ж структурних елементів (частинок), скільки атомів міститься в 0,012 кг вуглецю.

Кількість молекул в 1 молі речовини називають сталою Авогадро  $N_A$ :

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

Масу одного моля речовини називають молярною масою. Молярну масу можна розраховувати за формулами:

$$M = m_0 \cdot N_A;$$

$$M = M_r \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}.$$

Масу довільної кількості речовини визначають за співвідношенням:

$$m = m_0 \cdot N = m_0 \cdot \nu N_A = \nu M.$$

Кількість молекул у тілі розраховують так:

$$N = \nu N_A = \frac{m}{M} N_A.$$

**Температура** – параметр термодинамічної системи, який визначає її рівноважний стан.

### 3. Навчальний фізичний експеримент

#### Демонстрації

Модель броунівського руху [9, с. 101; 26, с. 17]. Ізотермічний процес [9, с. 109; 26, с. 31]. Ізохоричний процес [9, с. 114; 26, с. 38]. Ізобаричний процес [9, с. 112; 26, с. 36]. Залежність між об'ємом, тиском і температурою газу [9, с. 115, 26, с. 39].

**Фронтальна лабораторна робота:** “Вивчення одного з ізопроесів”.

#### 4. Методика вивчення основних питань теми

##### А. Основні положення МКТ

До основних положень МКТ належать наступні.

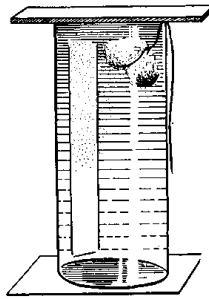
1. Будь-яка речовина складається з найдрібніших частинок – атомів, молекул, йонів тощо.
2. Частинки перебувають у безперервному хаотичному (тепловому) русі.
3. Частинки речовини взаємодіють між собою.

Засвоєння формулювань основних положень МКТ не викликають труднощів в учнів, оскільки в загальному вигляді вони знайомі учням з пропедевтичного курсу.

Інколи у формулюванні першого положення МКТ мова йде лише про молекули. Проте багато речовин не мають ні молекулярної, ні атомної структури. Наприклад, у вузлах кристалічної ґратки кухонної солі знаходяться йони натрію і хлору, у вузлах кристалічних ґраток металів також знаходяться йони, між якими рухаються вільні електрони. Тому доцільно говорити, що всі речовини складаються з частинок, а при необхідності вказувати, які частинки маються на увазі. Оскільки основні положення МКТ є вихідними елементами теорії, то вони мають бути добре обґрунтовані.

Важливим доказом дискретної будови речовини є зміна розмірів тіл під дією зовнішніх впливів. Так, тіла змінюють свої розміри при зміні температури, різних деформаціях. Для підтвердження наявності проміжків між частинками речовини доцільно розповісти учням, що при роботі потужних гідравлічних пресів зовнішні стінки циліндрів покриваються краплями гліцерину, який просочується через товсті стінки циліндрів міжмолекулярними проміжками. Разом з тим потрібно зробити зауваження, що міжмолекулярні проміжки не треба плутати з порами, які є в деревині, цеглі тощо.

Із всіх відомих на сьогодні способів доказу існування молекул учням варто розповісти про йонні та тунельні мікроскопи, за допомогою яких можна побачити великі молекули й окремі атоми, та показати відповідні фотографії. Такі фотографії є у багатьох підручниках фізики.



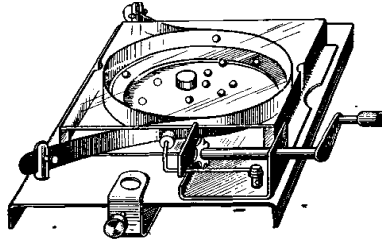
Мал. 7

Переконливим підтвердженням положення про рух частинок у речовині є явище дифузії, яке має місце у газах, рідинах і твердих тілах. Дифузія у газах відбувається досить швидко, повільніше – у рідинах і значно повільніше – у твердих тілах. Зважаючи на це, на уроках демонструють явище дифузії у газах. Установка для демонстрації показана на мал. 7. Методика і техніка цього досліду описана у посібнику [26]. У цьому ж посібнику дається опис демонстрації явища дифузії в рідинах, але вона має певну специфіку, оскільки результати дифузії стануть помітними лише через кілька діб. Тому її рекомендують, як правило, для проведення в домашніх умовах.

Дифузія у твердих тілах проходить дуже повільно, тому про такі досліди тільки розповідають та вказують на її застосування – дифузійне зварювання у вакуумі, азотування, цементація і ціанування зовнішніх частин деталей для надання їм потрібних якостей. У методичній і науково-популярній літературі можна знайти інші приклади застосування дифузії в різних галузях народного господарства та в побуті.

Важливим доказом хаотичності руху молекул є броунівський рух – хаотичний рух завислих у рідині або газі маленьких частинок твердого тіла. Явище можна демонструвати за допомогою мікропроекції або спостерігати за допомогою мікроскопа [26]. Але подібні досліди пов'язані зі значними технічними труднощами.



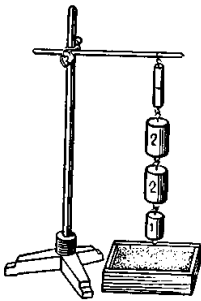


Мал. 8

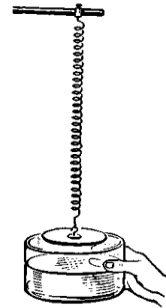
Тому при вивченні броунівського руху демонструють механічну модель (мал. 8), методика та техніка використання якої описані в посібниках [9; 26]. При демонстрації моделі важливо підкреслити, що пружні металеві кульки в ній моделюють молекули, а великий диск – броунівську частинку.

Маленькі броунівські частинки (диск) зазнають некомпенсованих ударів молекул (кульок) з різних боків, що і приводить до їх зміщення. У результаті цього траєкторія руху частинки має складну форму.

Існування сил притягання між молекулами підтверджується шляхом демонстрації дослідів. Це можуть бути досліди на зчеплення двох свинцевих циліндрів (мал. 9) або прилипання скляної пластинки до води (мал. 10), які описані в посібнику [9]. Підтвердженням наявності сил відштовхування між частинками є мала стискуваність рідин і твердих тіл.

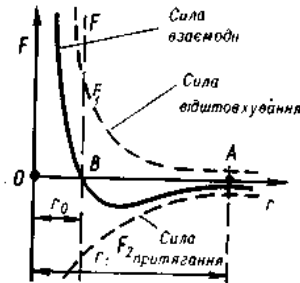


Мал. 9



Мал. 10

Учням треба підкреслити, що сили притягання та відштовхування в рідинах і твердих тілах діють одночасно, бо інакше тіла не могли б зберігати свою форму чи об'єм. Залежність сил взаємодії між двома молекулами від відстані між їх центрами з'ясовується при аналізі графіка (мал. 11). Тут суцільною лінією показано залежність рівнодійної сили взаємодії двох молекул від відстані між ними  $r$ . Відстань  $r_0$  – це та відстань, на якій вони перебували б при відсутності теплового руху. Якщо  $r > r_0$ , то переважають сили притягання, якщо  $r < r_0$  – переважають сили відштовхування.



Мал. 11

Залежність сил притягання від відстані між молекулами та їх природи використовується при склеюванні, фарбуванні.

### Б. Основні властивості молекул

Уявлення про основні властивості молекул учні мають з пропедевтичного курсу фізики основної школи. Під час вивчення молекулярної фізики в старшій школі ці уявлення треба поглибити, ознайомивши учнів з експериментальними методами визначення величин, що характеризують молекули: лінійні розміри, маса, швидкість та ін.

При з'ясуванні питання про розміри молекул розглядають досвід Релея, у якому краплю маслинової олії відомого об'єму опускають на поверхню води. Крапля розпливається і утворює плівку, площу якої можна виміряти. За об'ємом краплі і її пло-

шею визначають товщину плівки. Якщо вважати, що плівка олії утворює мономолекулярний шар, то її товщина буде рівна діаметру молекули олії. Насправді ж дослід дозволяє визначити лише порядок значення діаметра молекули. Демонстраційний дослід з наближеного визначення діаметра молекули рідини описано у посібнику [26, досл. 2]. За визначеним діаметром молекули можна оцінити її об'єм, а потім кількість молекул в одній краплі. Масу молекули можна визначити, якщо масу краплини (вона дорівнює добутку густини на об'єм) поділити на кількість молекул у краплі.

Методи сучасної фізики дають можливість з достатньою точністю визначати не тільки розміри і маси молекул, але і їх структуру.

Далі розглядають фізичні величини, якими оперує молекулярна фізика: атомна одиниця маси, відносна молекулярна маса, моль, молярна маса. Вони розглядалися в курсі хімії, тому їх треба лише повторити і уточнити.

### **В. Властивості ідеального газу**

При вивченні матеріалу про природу тиску газу потрібно з'ясувати, що кожне явище в молекулярній фізиці є результатом сукупної дії величезної кількості частинок, з яких складається макросистема. Основним завданням молекулярної фізики є встановлення зв'язку між макроскопічними величинами, що характеризують властивості макросистем і середніми значеннями величин, які характеризують властивості окремих частинок. Для спрощення процесу встановлення цього зв'язку потрібно створити певну модель будови речовини. Найпростішою з них є модель ідеального газу. За цією моделлю нехтують формою молекул, вважаючи їх пружними кульками дуже малих розмірів у порівнянні з відстанями між ними. Модель ідеального газу виключає взаємодію між молекулами. Реальні гази можна наближено вважати ідеальними лише при невеликих тисках і не дуже малих температурах.

Модель ідеального газу дозволяє розглядати тиск газу лише як результат пружних зіткнень молекул із стінками посу-

дини, у якій знаходиться газ. При зіткненні будь-якої молекули із стінкою змінюється імпульс кожної молекули, а, отже, і імпульс стінки. Зміна імпульсу всіх молекул за одиницю часу за модулем дорівнює силі, з якою газ тисне на стінку. Відношення цієї сили до площі стінки дорівнює тиску. Для підтвердження цього проводять дослід з роздування гумового балончика під ковпаком вакуумного насоса. На основі викладених вище міркувань виводиться основне рівняння МКТ.

Є різні способи виведення основного рівняння МКТ ідеального газу, які відрізняються лише рівнем математичного обґрунтування залежностей у процесі виведення. Розглянемо спрощений варіант виведення рівняння МКТ.

Нехай газ міститься у прямокутній посудині  $ABCD$  (розріз) (мал. 12). Будемо вважати температури газу і стінок однаковими. Процес виведення рівняння можна поділити на чотири логічні етапи.

*I етап.* Обчислимо імпульс, який отримає стінка  $CD$  при ударі однієї молекули за одне зіткнення.

При зіткненні молекули зі стінкою відбудеться зміна проекції імпульсу молекули на довільно обрану вісь  $OX$  (мал. 12):

$$-mv_x - mv_{0x} = -2mv_x.$$

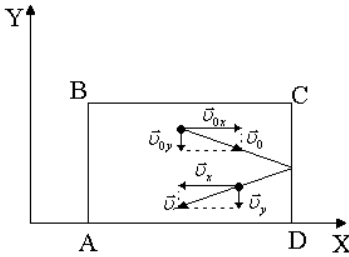
(Вважаємо, що модуль проекції імпульсу молекули не змінюється при пружному ударі).

*II етап.* Обчислимо кількість зіткнень молекул зі стінкою за час  $\Delta t$ .

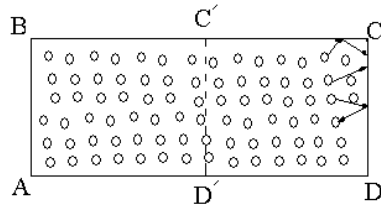
За час  $\Delta t$  до стінки  $CD$  можуть долетіти лише ті молекули, що знаходяться на відстані, не більшій за  $CC' = |v_x| \Delta t$  (мал. 13). Врахуємо, що стінки  $CD$  досягнуть молекули, швидкість яких направлена вправо (на малюнку), тобто, половина тих молекул, що знаходяться у шарі  $CC'D'D$ . Об'єм цього шару дорівнює  $V = |v_x| \Delta t S$ , а кількість молекул у ньому  $N = nV = n|v_x| \Delta t S$ . Отже, кількість молекул, які досягнуть стінки  $CD$  на протязі інтервалу часу  $\Delta t$ , буде рівною

$$z = \left(\frac{1}{2}\right)(nS|\bar{v}_x|\Delta t).$$

*III етап.* Знайдемо середнє значення сили, що діє на стінку. З цією метою помножимо імпульс, який отримує стінка від однієї молекули, на кількість ударів молекул у стінку за певний час і розрахуємо середнє значення квадрата швидкості молекул.



Мал. 12



Мал. 13

Тоді модуль імпульсу сили, що діє на стінку, буде:

$$F\Delta t = z \cdot 2m|v_x| = nmS\bar{v}_x^2\Delta t.$$

Якщо врахувати, що  $\bar{v}^2 = \bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + \bar{v}_z^2$  і  $\bar{v}_x^2 = \bar{v}_y^2 = \bar{v}_z^2$ , то

$$\bar{v}_x^2 = \frac{1}{3}\bar{v}^2.$$

Остаточно для середнього значення модуля імпульсу сили, що діє на стінку, отримаємо вираз:  $\bar{F}\Delta t = \frac{1}{3}nmS\bar{v}^2\Delta t.$

*IV етап.* Запис остаточного рівняння.

Поділимо обидві частини одержаної вище рівності на інтервал часу  $\Delta t$  і площу стінки  $S$ . У результаті дістанемо вираз для тиску газу:

$$p = \frac{1}{3}nm\bar{v}^2.$$

Цей вираз називають основним рівнянням МКТ ідеального газу. Воно встановлює зв'язок мікроскопічних параметрів молекул ( маса, концентрація і середній квадрат швидкості поступального руху) з макроскопічним параметром – тиском газу.

Оскільки  $\frac{m\bar{v}^2}{2} = \bar{E}_k$ , то рівняння може мати вигляд:

$p = \frac{2}{3}m\bar{E}_k$ , тобто, тиск ідеального газу пропорціональний концентрації молекул  $n$  та середньому значенню кінетичної енергії хаотичного поступального руху молекул.

Залежність тиску газу від середнього квадрата швидкості (а, отже, і енергії  $\bar{E}_k$ ) пояснюється тим, що із збільшенням швидкості зростає як імпульс молекули, так і кількість ударів молекул у стінку.

## Г. Температура

У курсі фізики загальноосвітньої школи фізичний зміст температури з'ясовують з двох точок зору – термодинамічної і молекулярно-кінетичної.

У ізольованій системі внаслідок взаємодії між тілами через певний час завжди встановлюється такий стан, коли макроскопічні параметри (тиск, об'єм тощо) системи у подальшому не змінюються. Такий стан називають станом теплової або термодинамічної рівноваги. У стані теплової рівноваги енергія системи розподіляється між її частинами єдиним способом.

Якщо два тіла з різними температурами привести у тепловий контакт, то енергія передається від тіла з вищою температурою до тіла з меншою температурою, внаслідок чого температура першого тіла зменшується, а другого – збільшується. Так відбувається доти, доки температури обох тіл не стануть рівними. Отже, різниця температур тіл вказує напрям теплообміну між ними.

Стан теплової рівноваги має властивість транзитивності: два тіла, які перебувають у тепловій рівновазі з одним і тим самим третім тілом, перебувають у тепловій рівновазі і між собою. На цій властивості теплової рівноваги ґрунтується спосіб вимірювання температури.

Температура є інтенсивним параметром, вона не має властивості адитивності, тому її не можна порівнювати з еталоном. Для вимірювання температури використовують залежність властивостей тіл (об’єму, тиску, довжини тощо) від температури. Якщо один із станів теплової рівноваги, наприклад, між водою і льодом, прийняти за нульовий, то температура будь-якого іншого стану цих тіл характеризуватиме рівень відхилення теплового стану цих тіл від стану, взятого за нульовий. Це положення використовують при конструюванні термометрів. У рідинних термометрах використовують залежність об’єму рідини від температури. Термометричне тіло приводять спочатку у теплову рівновагу з танучим льодом, а потім – з киплячою водою за нормального тиску. Температуру льоду, що тане, вважають рівною нулю, а води, що кипить, – 100 градусам. За один градус приймають одну соту шкали між цими температурами. Так встановлену температурну шкалу називають шкалою Цельсія.

Установлена описаним вище способом шкала має низку недоліків: вона нерівномірна, залежить від властивостей рідини і скла, одиниця температури встановлюється довільно, відсутній фізичний зміст.

Чітке означення температури можна дати на основі основного рівняння МКТ ідеального газу та дослідів. Оскільки в стані теплової рівноваги температура всіх частин системи однакова, то потрібно знайти таку фізичну величину, яка і мала б саме такі властивості. З аналізу процесів переходу до стану теплової рівноваги з термодинамічної і молекулярно-кінетичної точок зору приходять до висновку, що таку властивість має середня кінетична енергія поступального руху молекул. Але цю енергію безпосередньо на досліді визначити не можна. Виникає потреба відшукати величину, яка була б пропорційна середній кінетичній енергії молекул і яку можна було б визначити на досліді. З осно-

вного рівняння МКТ випливає, що  $\bar{E} = \frac{3}{2} \frac{p}{n}$ , де  $n$  – концентрація молекул. Отже, шуканою величиною може бути відношення  $\frac{p}{n}$ .

Після ознайомлення з відповідними дослідями формулюють висновок: середня кінетична енергія молекул пропорційна абсолютній температурі і записують співвідношення:

$$\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT.$$

З фізичного змісту температури випливає, що існує найменше значення температури, яке дорівнює нулю тоді, коли дорівнює нулю  $\bar{E}_k = \frac{m\bar{v}^2}{2}$ .

Цю температуру, за якої припинився б тепловий рух молекул, називають абсолютним нулем температури. Учнім треба зауважити, що абсолютного нуля температури практично досягти не можна. Шкалу температур, за якою температура відлічується від абсолютного нуля, а поділки якої дорівнюють градусам Цельсія, називають термодинамічною шкалою, а температуру, яку відлічують за цією шкалою, називають термодинамічною. Одиницею термодинамічної температури є кельвін,  $1 \text{ K} = 1^\circ\text{C}$ .

Між термодинамічною температурою і температурою за шкалою Цельсія існує такий зв'язок:

$$T = t + 273.$$

Середню квадратичну швидкість теплового руху молекул можна обчислити із співвідношення:

$$\frac{m_0\bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2} kT.$$

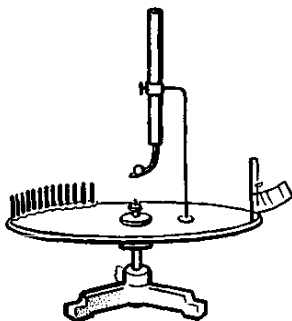


Звідси:  $v_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$  з врахуванням, що  $k = \frac{R}{N_A}$  і  $m_0 = \frac{M}{N_A}$

одержуємо:  $v_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$ .

Користуючись останньою формулою знаходять швидкість молекул, наприклад, азоту при 0°C. Вона більша, ніж  $490 \frac{M}{c}$ .

Велике числове значення швидкостей молекул газу, які були одержані на основі МКТ, здивували в свій час вчених і поставили під сумнів правильність самої МКТ. Сумніви розвіялися після проведення у 1920 р. відомим фізиком О. Штерном експериментальних досліджень, суть яких досить детально описано в шкільних підручниках. Для кращого розуміння ідеї досліду Штерна варто продемонструвати учням його модель (мал. 14).



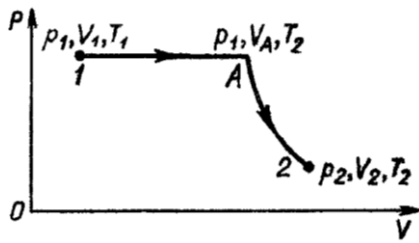
Мал. 14

При аналізі результатів досліду Штерна потрібно звернути увагу на те, що смужка срібла, отримана на зовнішньому циліндрі, розмита на краях і має змінну товщину. Пояснюють цей факт певним розподілом молекул за швидкостями.

### Д. Рівняння стану

Є два способи виведення рівняння стану ідеального газу – на основі експериментально відкритих газових законів (1) і на основі основного рівняння МКТ ідеального газ (2).

1. Стан ідеального газу визначається трьома мікро параметрами: тиском, об'ємом і температурою, але якщо відомі два параметри, то третій однозначно визначається двома іншими. Нехай газ певної маси переходить з одного стану з параметрами  $p_1, V_1, T_1$  в інший з параметрами  $p_2, V_2, T_2$ . Спочатку переведемо газ ізобарно в проміжний стан з параметрами  $p_1, V_A, T_2$ , а потім ізотермічно з проміжного стану в другий (мал. 15).



Мал. 15

Запишемо рівняння відповідних газових законів, за якими відбуваються ці ізопроееси. Для ізобаричного процесу матимемо:

$\frac{V_1}{V'} = \frac{T_1}{T_2}$ , а для ізотермічного –  $p_1 V' = p_2 V_2$ . Визначимо  $V'$  з

першого рівняння і підставимо в друге. Остаточнo одержимо :

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \text{const}.$$

Французький фізик Б. Клапейрон установив, що ця константа залежить від природи газу і пропорційна його масі, тобто  $\frac{pV}{T} = \nu m$ . З огляду на це останнє рівняння записують у

вигляді  $pV = \frac{m}{M}RT$  і називають рівнянням Менделєєва-Клайперона.

2. Рівняння стану ідеального газу (рівняння Менделєєва-Клайперона) також може бути одержане дедуктивно з основного рівняння МКТ ідеального газу. Оскільки  $p = \frac{2}{3}n\bar{E}$  і  $\bar{E} = \frac{3}{2}kT$ , то  $p = nkT$ .

Врахувавши, що  $n = \frac{N}{V}$ ;  $N = \frac{m}{M}N_A$  і  $kN_A = R$ , після спрощень одержимо:

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

Останній вираз і є рівнянням Менделєєва-Клайперона. Це рівняння потрібно проаналізувати і розглянути різні форми його запису:  $pV = \nu RT$ ;  $p = \frac{\rho}{M}RT$ .

Рівняння ізопроесів досить просто одержати з рівняння стану ідеального газу.

Розглядають математичні вирази ізотермічного, ізобаричного та ізохоричного процесів і їх графіки в різних координатах.

Виведення рівняння стану ідеального газу, виходячи з дослідних газових законів, просте і зрозуміле учням, проте такий шлях вимагає більших затрат часу. Крім того, при такому способі знижується роль дедукції, яка сприяє розвитку теоретичного мислення і має ширше застосовуватися в старшій школі. Одержання рівняння стану газу з основного рівняння МКТ ідеального газу показує, що кількість фундаментальних законів у фізиці не дуже велика, багато окремих законів можна одержати як окремі випадки прояву більш загальних.

#### 4. Типові задачі

Наводимо приклади задач.

##### ►► На розрахунок розмірів молекул, їх маси, концентрації та кількості

Яка кількість речовини та кількість молекул міститься в  $1 \text{ см}^3$  води?

##### ►► На застосування основного рівняння МКТ та висновків з нього

– Пластинку покривають у вакуумі шаром срібла. Пучок атомів срібла падає перпендикулярно до плоскої поверхні і всі атоми срібла осідають на ній. Швидкість атомів у пучку

$v = 400 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , концентрація  $n = 5 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ . Визначити тиск атомів срібла на пластинку.

– Супутник площею поперечного перерізу  $S = 1 \text{ м}^2$  рухається з першою космічною швидкістю ( $v = 7,8 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ) навколоземною орбітою. Атмосферний тиск на цій висоті (200 км)  $p = 1,37 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$ , температура  $T = 1226 \text{ К}$ . Знайти кількість зіткнень супутника з молекули газу за час  $t = 1 \text{ с}$ . Боковими ударами молекул можна знехтувати.

##### ►► На застосування законів ідеального газу

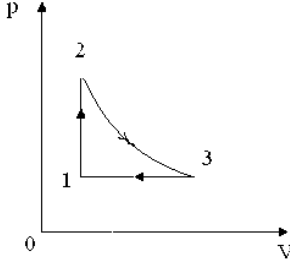
– Балон місткістю  $V_i = 40 \text{ дм}^3$  наповнено стиснутим повітрям під тиском  $p_1 = 1,5 \cdot 10^7 \text{ Па}$  при температурі  $t_1 = 300 \text{ К}$ . Який об'єм повітря можна витиснути з цистерни підводного човна повітрям, що є в балоні, якщо човен буде на глибині  $H = 20 \text{ м}$ , де температура  $T_2 = 280 \text{ К}$ ? Атмосферний тиск дорівнює  $p_a = 10^5 \text{ Па}$ .

– У приміщенні об'ємом  $V = 100 \text{ м}^3$  після роботи обігрівача температура повітря збільшилася від  $t_1 = 17^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 22^\circ\text{C}$ . Яка маса повітря вийшла з кімнати? Атмосферний тиск  $p = 10^5 \text{ Па}$ .

Молярна маса повітря  $M = 29 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ .

►► На побудову і аналіз графіків

На мал. 16 у координатах  $p, V$  зображено замкнений газовий процес (цикл). Побудувати графік цього процесу у координатах  $(p, T)$  і  $(V, T)$ . Крива 2-3 – ізотерма.



Мал. 16

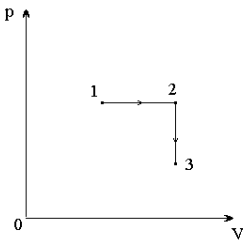
**6. Організація контролю і обліку знань учнів**

Для перевірки засвоєння учнями основних положень молекулярно-кінетичної теорії та рівняння стану ідеального газу доцільно періодично проводити короткочасні самостійні і контрольні роботи. Наводимо приклади завдань для таких робіт.

►► Основи МКТ

- Скільки молекул міститься в 28 г азоту?
- Які особливості (подібність і відмінність) теплового руху частинок у газах, рідинах і твердих тілах.

►► Рівняння МКТ



- На мал. 17 зображено зміну стану певної маси газу: а) назвіть процеси; б) напишіть рівняння процесу 1-2; в) побудуйте графіки процесів у координатах  $(p, T)$ .

– Розрахуйте об'єм азоту масою  $m = 4,0$  кг при тиску  $p = 4,0 \cdot 10^5$  Па і температурі  $T = 300$  К.

Мал. 17

При вивченні матеріалу теми корисними будуть завдання на заповнення таблиць такого типу:

Постійний параметр	Назва процесу	Зв'язок між іншими параметрами	Пояснення зв'язку між параметрами з точки зору МКТ	Графік ізопроцесу

Для систематизації знань учнів з усіх вивчених питань корисним буде завдання на заповнення клітинок структурно-логічної схеми. Схему дають на перших уроках вивчення теми, учні її заповнюють протягом вивчення теми. На одному з останніх уроків матеріал теми повторюється наприкінці уроку.



### Питання для самоконтролю

1. Яке світоглядне значення розділу “Молекулярна фізика”?
2. Якими демонстраційними дослідженнями можна підтвердити основні положення МКТ?
2. Назвати основні етапи виведення основного рівняння МКТ ідеального газу.
3. Дати термодинамічне та молекулярно-кінетичне трактування поняття температури.
4. Які існують методичні підходи до виведення основного рівняння МКТ?
5. Які можливі шляхи виведення рівняння стану ідеального газу?

---

## **Лекція 5.**

### **Методика вивчення теми**

### **“ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ”**

#### **1. Науково-методичний аналіз змісту та структури теми**

Тема має велике світоглядне і політехнічне значення. Під час вивчення теми поглиблюється розуміння учнями закону збереження і перетворення енергії. Він виконується в усіх процесах, які відбуваються на всіх відомих сучасній науці рівнях руху матерії і є вагомим свідченням матеріальної єдності об'єктивного світу. Закон збереження і перетворення енергії, окремим випадком якого є перший закон термодинаміки, встановлює нерозривний зв'язок матерії і руху, характеризує перехід одних форм руху матерії в інші. Вивчення термодинаміки потрібне для розуміння фізичних основ теплоенергетики, принципів дії теплових машин тощо.

У програмі з фізики [34] зміст теми викладено так.

Робота газу. Перший закон термодинаміки. Застосування першого закону термодинаміки до ізопроеесів. Рівняння теплового балансу для найпростіших теплових процесів. Адіабатичний процес. Необоротність теплових процесів. Принцип дії теплових двигунів. Двигун внутрішнього згоряння. Парова і газова турбіни. Реактивний двигун. Холодильна машина ККД теплового двигуна. Шляхи підвищення ККД теплових двигунів. Роль теплових двигунів у народному господарстві. Екологічні проблеми, пов'язані з використанням теплових двигунів.

## Структурно-логічна схема теми



## 2. Основні поняття та їх науково-методичний аналіз

У термодинаміці вивчаються взаємні перетворення різних видів енергії, пов'язані з кількістю теплоти і роботою. Основне завдання вивчення теми полягає у з'ясуванні фізичного змісту понять *внутрішньої енергії, кількості теплоти, роботи*.

Під *внутрішньою енергією* тіла в термодинаміці розуміють енергію, що залежить лише від його внутрішнього стану і не пов'язану з рухом відносно інших тіл. Внутрішня енергія тіла є однозначною функцією його стану і визначається його параметрами: тиском, об'ємом, температурою. Зміна внутрішньої енергії системи при переході з одного стану в інший не залежить від шляху її переходу, тобто вона є функцією стану, а не процесу.

З точки зору молекулярно-кінетичної теорії у сучасній фізиці під внутрішньою енергією розуміють *суму енергії хаотичного руху і взаємодії молекул і енергію руху і взаємодії частинок, з яких складаються молекули* (енергія коливального руху частинок, енергія електронних оболонок атомів, внутріядерна



енергія тощо). У термодинаміці вивчають процеси, що відбуваються при не дуже високих температурах. За таких умов зміни внутрішньої енергії відбуваються лише за рахунок її перших двох складових і оскільки завжди цікавляться зміною внутрішньої енергії, то під внутрішньою енергією можна розуміти суму кінетичної енергії хаотичного руху молекул і потенціальної енергії їх взаємодії, тобто вважають:  $U = E_k + E_p$ .

Внутрішня енергія системи може змінюватися шляхом виконання роботи або в процесі теплопередачі. У першому випадку мірою зміни внутрішньої енергії є робота, а в другому – кількість переданої теплоти. Робота і кількість теплоти залежать не тільки від початкового і кінцевого стану системи, а й від того, як відбувається процес зміни цих станів. Це означає, що *робота і кількість теплоти* характеризують процес зміни стану системи, вони є не функціями стану, а функціями процесу. З цього випливає, що говорити про запас кількості теплоти і запас роботи не можна. Можна лише говорити про внутрішню енергію системи.

Шляхом виконання роботи і передачі кількості теплоти можна досягти однакових змін внутрішньої енергії. Це дає підстави говорити про *еквівалентність кількості теплоти і роботи*. Проте робота і кількість теплоти нерівноцінні способи зміни енергії. **Робота – це зміна енергії упорядкованого руху системи**, виконання роботи може приводити до зміни як механічної, так і внутрішньої енергії. При *теплопередачі* (передачі кількості теплоти) *змінюється енергія хаотичного руху частинок* системи, що приводить лише до зміни її внутрішньої енергії. Роботу вважають макрофізичною формою зміни енергії, а кількість теплоти – мікрофізичною формою її зміни.

Оскільки внутрішню енергію системи можна змінювати шляхом передачі кількості теплоти і виконанням роботи зовнішніми силами над системою, то записують:

$$\Delta U = Q + A_{\text{зовн.}}$$

Останній вираз є математичним записом **першого закону термодинаміки**.

### 3. Навчальний фізичний експеримент

#### Демонстрації

Зміна внутрішньої енергії тіла внаслідок виконання механічної роботи [9, с. 119; 26, с. 40].

Зміна температури повітря при адіабатичному розширенні та стисканні [9, с. 49; 26, с. 49, с. 122].

Необоротність явища дифузії (на моделі) [9, с. 25].

### 4. Методика вивчення основних питань теми

**А.** Першим етапом вивчення термодинаміки є формування поняття внутрішньої енергії. Опираючись на знання учнів з базового курсу фізики і знання, одержані при вивченні МКТ, дають означення внутрішньої енергії у молекулярно-кінетичному розумінні: *під внутрішньою енергією системи розуміють кінетичну енергію хаотичного руху молекул і потенціальну енергію їх взаємодії.*

Потрібно підкреслити, що кінетична енергія руху молекул визначається відносно центра мас системи, а під потенціальною енергією розуміють енергію взаємодії молекул між собою, а не з іншими тілами.

Далі з'ясовують, що розрахувати внутрішню енергію довільного тіла дуже складно або й практично неможливо. Це досить просто можна зробити для випадку одноатомного ідеального газу, бо його молекули здійснюють лише поступальний рух. Оскільки середня кінетична енергія поступального руху молекул дорівнює  $\bar{E} = \frac{3}{2}kT$ , то для розрахунку внутрішньої енергії ідеального газу потрібно енергію однієї молекули помножити на їх кількість  $N$ , яка рівна  $N = \frac{m}{M}N_A$ . Тоді

$$U = \bar{E} \cdot N = \frac{3}{2}kT \frac{m}{M}N_A = \frac{3}{2} \frac{m}{M} kN_A T = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT.$$

Внутрішня енергія одноатомного ідеального газу залежить лише від температури, а зміна внутрішньої енергії відбувається лише за рахунок зміни температури:

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T .$$

Внутрішня енергія ідеального газу, який складається із складніших молекул теж залежить від температури, але коефіцієнт пропорційності буде іншим, бо такі молекули мають ще й кінетичну енергію обертального руху.

Перед показом способів зміни внутрішньої енергії варто показати дослід, який демонструє наявність внутрішньої енергії газу. Для цього товстостінну пробірку закривають корком, розміщують під ковпаком вакуумного насоса і відкачують повітря.

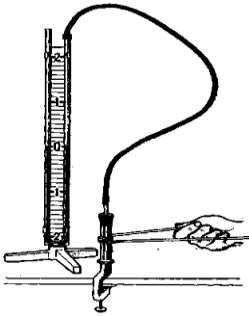
При досягненні певного розрідження корок вилітає з пробірки. Повітря, що було у пробірці, виконало роботу з вильоту корка, а про тіла, що можуть виконати роботу, кажуть, що вони мають енергію. Отже, повітря у пробці мало енергію, яку називають внутрішньою.

Далі розглядають способи зміни внутрішньої енергії. Про зміну внутрішньої енергії судять по зміні температури тіла. Продемонструвати зміну внутрішньої енергії шляхом виконання роботи можна за допомогою трубки Тіндаля і манометра (мал. 18). Існують й інші способи демонстрації зміни внутрішньої енергії шляхом виконання роботи.

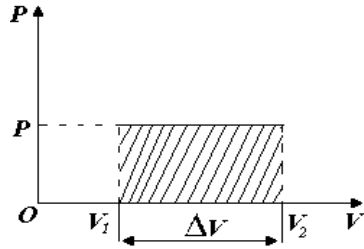
Потім детальніше розглядають процес ізобаричного розширення газу в циліндрі під поршнем і одержують вираз:

$$A = p(V_2 - V_1) = p \Delta V.$$

З'ясовують, що роботу газу в ізобаричному процесі можна обчислити за його графіком у системі координат  $p, V$  (мал. 19).



Мал. 18

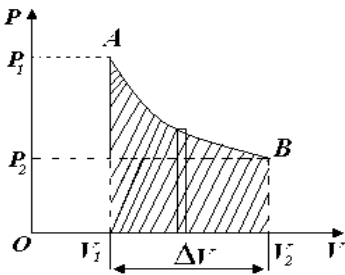


Мал. 19

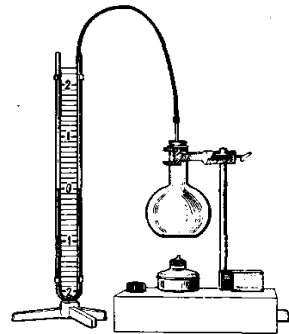
Робота газу дорівнює площі прямокутника висотою  $p$  і основою  $\Delta V$ .

Для довільних процесів (мал. 20) робота чисельно дорівнює площі фігури, що обмежена графіком залежності  $p$  від  $V$ , віссю  $V$  і двома ординатами, що відповідають тискам  $p_1$  і  $p_2$ . Це твердження можна довести, якщо розбити площу фігури на вузькі ділянки, у межах яких тиск можна вважати сталим.

Зміну внутрішньої енергії шляхом теплопередачі можна продемонструвати на досліді за малюнком 21.



Мал. 20



Мал. 21

Пояснюють, що у цьому випадку частина внутрішньої енергії гарячого полум'я передається колбі і газу в колбі.

Далі пригадують формули для розрахунку кількості теплоти при нагріванні тіл, плавленні, пароутворенні і згорянні палива:

$$Q = cm(t_2 - t_1) = cm(T_2 - T_1); Q = \lambda m; Q = rm; Q = q m.$$

При нагрівання змінюються розміри тіл і температура, тому змінюються обидві складові внутрішньої енергії. При плавленні і пароутворенні температура тіл не змінюється, тому змінюється лише потенціальна енергія взаємодії молекул.

Оскільки внутрішню енергію системи можна змінювати шляхом передачі кількості теплоти і виконанням роботи зовнішніми силами над системою, то записують:  $\Delta U = Q + A_{\text{зовн.}}$ .

Останній вираз є математичним записом першого закону термодинаміки.

Часто замість роботи зовнішніх сил над системою користуються поняття роботи сил системи над зовнішніми тілами  $A$ . Враховуючи, що  $A_{\text{зовн.}} = -A$ , перший закон термодинаміки записують у вигляді:  $Q = \Delta U + A$  і формулюють його так: кількість теплоти, яка надається системі, іде на збільшення внутрішньої енергії системи і на виконання системою роботи над зовнішніми тілами. Перший закон термодинаміки є виразом закону збереження і перетворення енергії для теплових процесів.

Перший закон термодинаміки має загальний характер і стосується всіх без винятку явищ природи. Усі явища і процеси в природі супроводжуються виконанням роботи або теплообміном, тому застосування до них першого закону термодинаміки дає можливість зробити важливі висновки про особливості їх перебігу.

Важливим етапом у вивченні першого закону термодинаміки є розгляд його дії в ізопроцесах.

**Ізохоричний процес ( $V = \text{const}$ ).** Цей процес відбувається тоді, коли газ знаходиться в жорсткій теплопровідній оболонці. Оскільки об'єм газу при зміні температури не змінюється, то робота не виконується. Отже, для ізохоричного процесу перший закон термодинаміки набуває вигляду  $Q = \Delta U$ . Якщо  $Q > 0$ , то і

$\Delta U > 0$ , і навпаки. Енергія, яку газ одержує шляхом теплообміну, повністю іде на збільшення його внутрішньої енергії, а енергія, що віддає газ шляхом теплообміну, дорівнює зменшенню його внутрішньої енергії. Про зміну внутрішньої енергії газу в ізохоричному процесі можна судити за зміною його температури і тиску. При зміні температури газу на  $\Delta T$ ,  $Q = c_V m \Delta T$ , де  $c_V$  – питома теплоємність газу при сталому об'ємі. Оскільки  $\Delta U = Q_V$ , то  $\Delta U = c_V m \Delta T$ .

**Ізобаричний процес ( $p = \text{const}$ ).** Тиск газу змінюватись не буде, якщо зміна його температури супроводжується відповідною зміною об'єму. У ізобаричному процесі внутрішня енергія газу змінюється і шляхом теплообміну, і шляхом виконання роботи. Рівняння першого закону термодинаміки для цього процесу матиме вигляд:  $Q_p = \Delta U + p \Delta V$ .

Це означає, що кількість теплоти, яка надається газу при  $p = \text{const}$ , частково іде на збільшення його внутрішньої енергії і частково на виконання роботи газом при його розширенні. Звертаємо увагу учнів на те, що зміна його внутрішньої енергії не дорівнює кількості теплоти, яка передається газу.

Оскільки  $\Delta U = Q_V$ , то виразу першого закону термодинаміки для ізобаричного процесу можна надати вигляду:  $Q_p = Q_V + p \Delta V$ .

З останнього рівняння легко прийти до висновку, що для підвищення температури ідеального газу на  $\Delta T$  при  $p = \text{const}$  потрібна більша кількість теплоти, ніж при  $V = \text{const}$ , оскільки частина кількості теплоти іде на виконання роботи.

Кількість теплоти в ізобаричному процесі можна розрахувати за формулою  $Q_p = c_p m \Delta T$ , де  $c_p$  – питома теплоємність газу при сталому тиску.

**Ізотермічний процес ( $T = \text{const}$ ).** Внутрішня енергія ідеального газу залежить лише від температури, тому внутрішня енергія ідеального газу в ізотермічному процесі не змінюється. Перший закон термодинаміки для цього процесу має вигляд:  $Q = A$ .

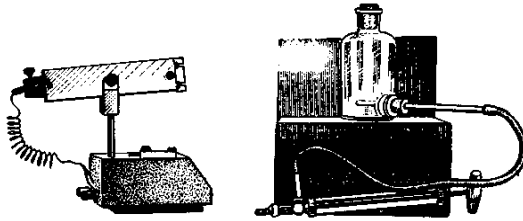
Це означає, що ізотермічний процес може відбуватися лише за наявності теплообміну з навколишніми тілами. Якщо  $Q > 0$ , то і  $A > 0$ , тобто енергія, яку одержує газ у вигляді кількості теплоти, повністю віддається зовнішньому середовищу шляхом

виконання роботи. Якщо газ ізотермічно стискувати, то енергія, яку одержує газ внаслідок виконання роботи зовнішніми силами, повністю віддається навколишньому середовищу у вигляді кількості теплоти.

**Адіабатичний процес ( $Q = 0$ ).** Це процес, що відбувається в системі без теплообміну з навколишнім середовищем. Перший закон термодинаміки для цього процесу записується так:

$$0 = \Delta U + A \text{ або } A = -\Delta U.$$

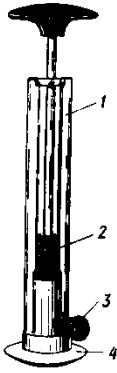
У адіабатичному процесі обмін енергією системи з навколишнім середовищем відбувається шляхом виконання роботи. Якщо система виконує роботу над зовнішніми тілами, то її внутрішня енергія зменшується, у випадку ідеального газу це приводить до зменшення його температури. Це можна показати на досліді.



Мал. 22

У зволожений і задимлений бутель з двома горловинами, одна з яких закрита суцільним корком, (мал. 22) нагнітають повітря. При досягненні певного тиску повітря у бутелі з нього швидко витягують корок і спостерігають утворення туману в бутелі, що свідчить про охолодження повітря у ньому. Дають учням необхідні пояснення. У посібнику [26] описано й інші досліди, що демонструють охолодження повітря при його адіабатичному розширенні. Якщо ж над газом виконують роботу, то його внутрішня енергія збільшується. Це можна продемонструвати у досліді з повітряним вогнивом (мал. 23). Техніку підготовки приладу і виконання досліду детально описано в посібнику [26].

Учням треба пояснити, що ідеальних адіабатичних оболонок у природі не існує, проте якщо процеси відбуваються досить швидко, то теплообмін з навколишнім середовищем не встигає



Мал. 23

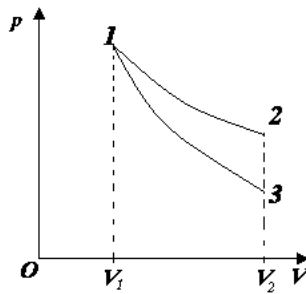
відбутися і їх можна вважати близькими до адіабатичних. Далі наводять приклади адіабатичних процесів, що відбуваються у техніці і природі. У дизельних двигунах стискається не робоча суміш, а повітря. При швидкому стисканні температура повітря підвищується і під кінець такту перевищує температуру загоряння пального, яке впорскується в циліндр через спеціальну форсунку. Цікавим прикладом адіабатичного охолодження у значних масштабах є охолодження повітря в земній атмосфері. У сонячний день нагріте біля поверхні Землі повітря піднімається вгору і розширюється. Це супроводжується значним зниженням температури, внаслідок чого вода пара конденсується і утворюються хмари.

Процес розширення повітря можна вважати адіабатичним, бо для передачі певної кількості теплоти від сусідніх більш теплих повітряних мас потрібен значний час, адже повітря поганий провідник тепла.

Варто з'ясувати з учнями механізм зміни внутрішньої енергії газу при виконанні роботи. Це можна зробити на прикладі адіабатичного стискання і розширення газу в циліндрі з поршнем. При нерухомому поршні молекули газу не змінюють модуля швидкості. Якщо ж газ стискається, то молекули будуть пружно відбиватися від рухомого поршня з більшими швидкостями, ніж у випадку нерухомого поршня. Оскільки внутрішня енергія ідеального газу це кінетична енергія руху його молекул, то внутрішня енергія газу збільшується. При адіабатичному розширенні газу його молекули відбиваються від поршня з меншими швидкостями, а, отже, їх кінетична енергія буде зменшуватись, відповідно буде зменшуватись температура і внутрішня енергія газу.



На відміну від ізотермічного, ізохоричного і ізобаричного процесів в адиабатичному процесі змінюються три параметри газу: тиск, об'єм, температура. Варто порівняти графіки ізотермічного та адиабатичного процесів у координатах  $p$ ,  $V$  (мал. 24). Крива 1-2 на цьому графіку є ізотермою, а крива 1-3 – адиабатою. При однакових змінах об'єму газу в ізотермічному та адиабатичному процесах тиск в останньому змінюється більше. Це пояснюється тим, що в адиабатичному процесі температура газу змінюється.



Мал. 24

**Б.** Перший закон термодинаміки є одним з найзагальніших законів природи. Він діє в усіх без винятку процесах. Ніколи не відбудеться процес, якщо він суперечить першому закону термодинаміки. Проте, не кожний процес, що не суперечить першому закону термодинаміки, відбувається в природі.

Відомо, що при теплообміні відбувається вирівнювання температур тіл, тобто тіло з вищою температурою віддає певну кількість теплоти більш холодному тілу. Перший закон термодинаміки не суперечить процесу, в якому певна кількість теплоти самодовільно передавалася б від тіла з меншою температурою до тіла з вищою температурою. Але такий процес сам собою ніколи не відбувається. Отже, першого закону недостатньо для того, щоб визначити напрям перебігу процесів.

З історії науки відомо багато спроб створити такий двигун, який би виконував роботу без затрат енергії. Такий гіпотетичний двигун назвали вічним двигуном першого роду. З відкриттям

закону збереження і перетворення енергії стало зрозуміло, що вічний двигун першого роду неможливий. Проте, перший закон термодинаміки не заперечує існування вічного двигуна другого роду, тобто такого періодично діючого двигуна, який би виконував роботу за рахунок внутрішньої енергії одного єдиного джерела енергії, наприклад, за рахунок охолодження води океанів чи надр Землі.

Узагальнення всього величезного експериментального матеріалу привело до висновку про неможливість створення вічного двигуна другого роду. Цей висновок і є другим законом термодинаміки. Другий закон термодинаміки не є абсолютним законом природи. Він незастосовний до мікросистем, тобто систем, що складаються з невеликої кількості мікрочастинок.

З другого закону термодинаміки випливає висновок про нерівноцінність двох видів передачі енергії – роботи і кількості теплоти.

Другий закон термодинаміки має кілька формулювань. Наведемо два з них.

Формулювання **Клаузіуса**.

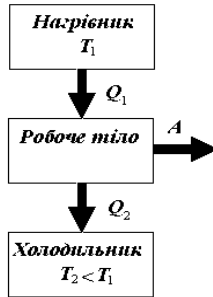
*Неможливий термодинамічний процес, єдиним результатом якого була б передача внутрішньої енергії від менш нагрітого тіла до більш нагрітого.*

Формулювання **Томсона**.

*Неможливий коловий процес, єдиним результатом якого було б виконання роботи за рахунок внутрішньої енергії, що відбирається від будь-якого тіла шляхом теплообміну.*

Вивчення другого закону термодинаміки в курсі фізики загальноосвітньої школи з достатньою повнотою неможливе, мова може йти лише про виклад основних наслідків його дії.

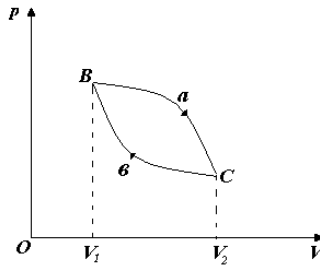
**В.** Теплові двигуни призначені для перетворення внутрішньої енергії палива в механічну. Тепловий двигун виконує корисну роботу за рахунок внутрішньої енергії при переході певної кількості теплоти від тіла з вищою температурою до тіла з меншою температурою. Тепловий двигун працює циклічно і складається з трьох частин: нагрівника, робочого тіла і охолоджувача. Термодинамічна схема теплового двигуна зображена на малюнку 25.



Мал. 25

Учні мають усвідомити, що для безперервного виконання роботи за рахунок внутрішньої енергії необхідно, щоб робоче тіло здійснювало циклічний процес. Для цього доцільно розглянути приклад розширення газу в циліндрі з рухомим поршнем. При розширенні газ виконує роботу, його внутрішня енергія внаслідок цього зменшується. Оскільки циліндр має обмежені розміри, то за один хід поршня в механічну енергію можна перетворювати лише невелику частину внутрішньої енергії.

Для здійснення повторного розширення робочого тіла і виконання ним роботи необхідно стиснути робоче тіло, привести поршень і робоче тіло у попередній стан. Якщо стискати робоче тіло при тих же тисках, при яких воно розширювалось, то зовнішні сили мають виконати таку ж роботу, яку робоче тіло виконало при розширенні, і робота газу за цикл виявиться рівною нулю. Щоб корисна робота за цикл була більша від нуля, необхідно робоче тіло стискати при тисках нижчих, ніж при розширенні.



Мал. 26

У цьому випадку робота зовнішніх сил при стисканні, яка чисельно дорівнює площі фігури  $V_2 C\delta BV_1$  (мал. 26), буде менша від роботи, що виконується при розширенні робочого тіла, і яка чисельно дорівнює площі  $V_1 B aCV_2$ . Площа, обмежена замкнутою кривою  $VaC\delta B$ , чисельно дорівнює корисній роботі, що виконується за один цикл. Оскільки крива  $C\delta B$  розташована нижче кривої  $VaC$  в осях  $p, V$ , то це означає, що робоче тіло перед стисканням необхідно охолодити.

На основі аналізу графіка роблять висновок, що циклічно діючий тепловий двигун повинен мати нагрівник, робоче тіло і холодильник (див. мал. 25). Робоче тіло за один цикл одержує від нагрівника кількість теплоти  $Q_1$ , віддає холодильнику кількість теплоти  $Q_2$  і виконує роботу  $A$ , яка дорівнює  $Q_1 - Q_2$ .

Учням корисно продемонструвати дослід Дарлінга, який моделює принцип роботи теплового двигуна. Дослід має важливе методичне значення, оскільки дає можливість ввести поняття циклу роботи теплового двигуна і з'ясувати роль нагрівника, робочого тіла і холодильника. У прозору скляну посудину з водою при температурі біля  $60^\circ\text{C}$  вливають  $150 \dots 200 \text{ см}^3$  аніліну. Анілін розпадається на окремі краплі, які тонуть у воді, оскільки при температурі, нижчій від  $64^\circ\text{C}$ , анілін має більшу густину, ніж вода. Посудину ставлять на нагрівник і повільно нагрівають. Коли температура досягне  $64^\circ\text{C}$ , краплі аніліну починають спливати на поверхню води, утворюючи суцільний шар аніліну. Анілін охолоджується, починає обвисати біля центра, утворюючи краплю, яка обривається і опускається на дно посудини. Опустившись, крапля нагрівається і спливає вгору, зливаючись з шаром аніліну. Такий процес автоматично повторюється доти, доки триває процес нагрівання і охолодження аніліну. У посібнику [26] описано й інші досліди, що демонструють принцип дії теплових двигунів.

Коефіцієнт корисної дії теплового двигуна відомий учням з базового курсу, тому вивчення матеріалу доцільно почати з того, що в тепловій машині, яка діє циклічно, робоче тіло дістає певну кількість теплоти  $Q_1$  від нагрівника, але не всю її можна використати для виконання роботи. Певну кількість теплоти  $Q_2$

робоче тіло повинно віддати холодильнику. Отже, робота, яку виконує тепловий двигун, не може бути більшою від  $A = Q_1 - Q_2$ . На основі цього дають означення коефіцієнта корисної дії і записують відповідну формулу:

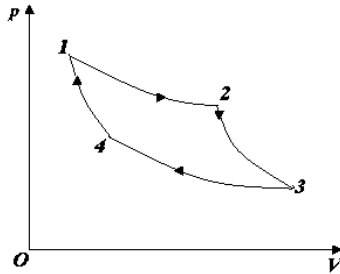
$$\eta = \frac{A}{Q_1} \quad \text{або} \quad \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

Формулу потрібно проаналізувати. Оскільки  $Q_2$  не може дорівнювати нулю, то завжди  $\eta < 1$ . У проведених розрахунках не враховувались втрати енергії на тертя, теплопровідність, випромінювання. Тепловий двигун, для якого ці втрати не враховують, називають ідеальним. ККД реальних теплових двигунів менший, ніж ідеальних.

Важливим практичним завданням техніки є створення теплових двигунів з якомога вищим ККД, тобто таких, у яких для виконання роботи використовується якомога більша частина кількості теплоти, одержаної від нагрівника. Аналізуючи роботу теплових двигунів французький інженер і вчений С. Карно прийшов до висновку, що максимальний ККД може бути досягнутий тоді, коли одержання і віддача кількості теплоти робочим тілом буде відбуватись при постійній температурі, а температура робочого тіла буде змінюватись тільки в процесі виконання роботи. Карно запропонував цикл ідеальної теплової машини, що складається з двох ізотерм (1-2, 3-4) і двох адіабат (2-3 і 4-1) (мал. 27). Саме цей цикл дає максимальне значення ККД теплового двигуна. Для циклу Карно формула максимального ККД має вигляд

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

де  $T_1$  і  $T_2$  – температури нагрівника і холодильника відповідно.



Мал. 27

Зауважують, що ККД ідеальної теплової машини не залежить від природи і властивостей робочого тіла та конструкції двигуна, він визначається лише температурами нагрівника і холодильника. Тепловий двигун тим ефективніший, чим нижча температура холодильника або вища температура нагрівника. З формули видно, що ККД не може дорівнювати одиниці, отже температура  $T_1$  нагрівника не може прямувати до нескінченості, або температура  $T_2$  холодильника не може дорівнювати абсолютному нулю.

Аналіз формули  $\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$  вказує шляхи підвищення

ККД теплових двигунів. Оскільки температура холодильника не може бути нижчою від температури оточуючого середовища, то основний спосіб підвищення ККД теплових двигунів полягає у підвищенні температури нагрівника, яке можливе лише у певних межах.

Цикл Карно ідеальний. У реальних двигунах не можна створити умови, за яких робочий цикл складався б з ізотерм і адіабат, тому його ККД завжди менший від максимально можливого.

Далі з учнями розглядають принципи роботи та робочі цикли деяких двигунів внутрішнього згоряння.

Важливе освітнє і виховне значення має розгляд питань негативного впливу теплових двигунів на оточуюче середовище

та зв'язаних з цим екологічних проблем, таких як теплове забруднення атмосфери, і глобальне потепління. Одним з шляхів подолання такого негативного впливу є збільшення ККД теплових двигунів.

## 5. Типові задачі

### ► На теплові процеси в ідеальних газах

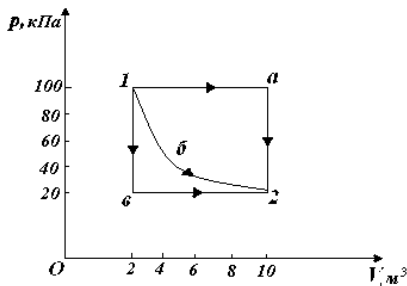
(Їх розв'язують на основі першого закону термодинаміки або його окремих випадків із застосуванням рівняння стану газу)

– Ідеальний газ переводиться із стану 1 у стан 2 трьома способами:

1а2; 1б2; 1в2 (мал. 28)

а) Яким станам газу відповідає найбільша, найменша, однакові температури?

б) У якому випадку виконується найменша робота? Чому вона дорівнює?



Мал. 28

– Обчислити зміну внутрішньої енергії, виконану роботу і кількість теплоти, що надали  $m = 300$  г гелію внаслідок ізобарного підвищення температури від  $T_1 = 293$  К до  $T_2 = 373$  К.

►► **На рівняння теплового балансу**

У калориметр, в якому знаходиться вода об'ємом  $V=1$  л при температурі  $t_1=20^\circ\text{C}$ , вкидають шматок заліза масою  $m_2=100$  г, температура, якого  $t_2=500^\circ\text{C}$ . Унаслідок цього деяка кількість води перетворюється у пару. Визначити масу води, що перетворилася в пару, якщо остаточна температура води  $\Theta=24^\circ\text{C}$ .

►► **На перетворення механічної енергії у внутрішню та внутрішньої у механічну, а також задачі на визначення ККД теплових машин**

– Молот масою  $M=10$  т падає з висоти  $h=2,5$  м на залізну деталь масою  $m=200$  кг. Скільки разів він повинен упасти, щоб температура деталі підвищилася на  $\Delta T=40$  К? Уважати, що на збільшення внутрішньої енергії деталі йде  $\eta=60\%$  механічної енергії молота.

– У топці парової машини спалено  $m=200$  кг мазуту. Яку максимальну роботу можна теоретично виконати такою машиною, якщо в котлі машини підтримується температура  $T_1=420$  К, а температура холодильника  $T_2=285$  К? ККД топки  $\eta=60\%$ .

►► **Задачі можуть бути якісні, розрахункові та графічні.**

## 6. Організація контролю і обліку знань учнів

Навчальний матеріал засвоюється більш міцно і глибоко, якщо він приведений у певну систему. Для систематизації знань учнів з теми можна поступити так. На початку вивчення теми дають учням її структурну схему, але не заповнену. У процесі вивчення теми учні заповнюють відповідні клітини (записують означення, формули, співвідношення і закони). На останньому уроці вивчення теми обговорюють з учнями заповнену структурну схему матеріалу, збирають ці схеми і виставляють оцінку.





### Питання для самоконтролю

1. Які поняття теми відносять до основних?
2. Чому в означенні внутрішньої енергії називають *лише* кінетичну енергію руху молекул та потенціальну енергію їх взаємодії між собою?
3. Як формулюється перший закон термодинаміки?
4. Чому теплоємність газу при сталому тиску більша, ніж при сталому об'ємі?
5. Який механізм зміни внутрішньої енергії при виконанні роботи?
6. Що таке вічний двигун другого роду?
7. Чим відрізняються теплова і холодильна машина?
8. Як переконати учнів, що теплова машина не може працювати без холодильника?

---

## Лекція 6 – 7.

# МЕТОДИКА ВИВЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ РЕЧОВИНИ В РІЗНИХ АГРЕГАТНИХ СТАНАХ

### 1. Методика вивчення властивостей парів

Під час вивчення теми поглиблюються поняття випаровування, кипіння, конденсації; формуються нові поняття: насичена і ненасичена пара, динамічна рівновага, вологість повітря; пояснюються основні властивості насиченої пари з точки зору МКТ; учнів знайомлять із способами визначення вологості повітря. У зв'язку з цим тема має велике освітнє, пізнавальне і практичне значення, оскільки поняття і закони, описані в темі, використовуються у теплотехніці при розрахунку парових котлів та установок для одержання низьких температур і зрідження газів. Світоглядне значення теми визначається тим, що проявляється перехід кількісних змін у якісні.

Перехід рідини в пару називається *пароутворенням*. Пароутворення може відбуватись двома шляхами – випаровуванням і кипінням. Спочатку розглядають випаровування та з'ясовують його механізм. Температура рідини, як і будь-якої речовини, визначається середньою кінетичною енергією її молекул. Проте, за будь-якої температури в рідині є молекули, що мають кінетичні енергії значно більші за середню. Цієї кінетичної енергії достатньо для виконання роботи виходу за межі поверхні рідини. З ростом температури інтенсивність випаровування зростає, адже середня кінетична енергія молекул пропорційна термодинамічній температурі. Оскільки при випаровуванні рідини з неї вилітають найбільш швидкі молекули, то середня кінетична енергія молекул, що залишаються в рідині,

зменшується, отже температура рідини зменшується. Продемонструвати це явище можна у такому ефектному досліді. Під склянку з деякою кількістю бензину чи спирту капають декілька крапель води, потім через склянку інтенсивно продувають повітря, що викликає інтенсивне випаровування рідини і її охолодження. При правильній обраній швидкості продування повітря можна досягти такого зниження температури, при якому склянка примерзне до стола.

Охолодження рідини при випаровуванні використовується в холодильній техніці. Учнів зацікавить використання цього явища у космонавтиці. При поверненні космічних кораблів на Землю в результаті тертя з повітрям вони можуть перегрітись. Щоб запобігти перегріванню космічні апарати покривають спеціальними плитками, які випаровуються при входженні апаратів у атмосферу і оберігають їх від перегрівання.

У відкритій посудині рідина постійно випаровується, проте її температура залишається лише дещо нижчою, ніж температура оточуючого середовища. Учням ставлять завдання з'ясувати це питання. Справа в тому, що до рідини надходить весь час деяка кількість теплоти від оточуючого повітря, температура якого вища від температури рідини.

Потім з'ясовують механізм процесу конденсації пари. Молекули, які вилетіли з рідини, здійснюють хаотичний тепловий рух, тому деяка їх частина рухається до рідини, досягає її поверхні і знову стає молекулами рідини.

Після з'ясування механізму конденсації розглядають процес випаровування рідини у відкритій і закритих посудинах. У відкритій посудині молекули, які вийшли за межі рідини, поступово відходять у навколишній простір, тому кількість молекул рідини, що вилітає з неї переважає кількість тих, які повертаються в рідину. За певний час рідина повністю випаровується.

У закритій посудині спостерігається інша картина. Молекули, які випаровуються, залишаються над рідиною, їх концентрація і, відповідно, тиск пари поступово збільшуються. Оскільки концентрація молекул пари зростає, то зростає і кількість молекул, які повертаються в рідину. У момент, коли кількості моле-

кул, що в середньому вилітають з рідини і повертаються до неї, зрівнюються, настає динамічна рівновага пари й рідини. У цьому випадку концентрація молекул пари не змінюється. *Пара*, яка перебуває у динамічній рівновазі з своєю рідиною, називається *насиченою*. Це означає, що при заданій температурі концентрація або кількість молекул пари досягає найбільшого значення, а отже, і тиск пари стає найбільшим. *Тиск насиченої пари* – це найбільший тиск, який може мати пара при даній температурі. Для насиченої пари можна застосувати рівняння Менделєєва-Клапейрона.

Із сказаного вище випливає висновок, що тиск насиченої пари при сталій температурі не залежить від об'єму. Цей висновок, потрібно підтвердити експериментально У методичній літературі [26] описано декілька варіантів демонстраційних дослідів, що підтверджують цей висновок. На цих же установках можна показати залежність тиску насиченої пари від температури.

Тиск ідеального газу при сталому об'ємі лінійно залежить від температури, а тиск насиченої пари при підвищенні температури зростає швидше. Це пояснюється тим, що на відміну від газу при підвищенні температури концентрація молекул насиченої пари зростає.

Пароутворення може відбуватися у вигляді кипіння. Механізм кипіння добре з'ясовується в підручниках. Разом з тим потрібно дати узагальнене означення процесу кипіння: *кипіння* – це процес пароутворення в усьому об'ємі рідини за температури, коли тиск пари дорівнює тиску в рідині.

Температура кипіння при зменшенні тиску над рідиною зменшується, а при збільшенні тиску зростає. Показати кипіння води при зниженому тиску можна у такому досліді. Скляну круглодонну колбу заповнюють до половини підігрітою водою (для скорочення тривалості досліді), закривають гумовою пробкою, крізь яку пропущено відрізок скляної трубки. На трубку натягують гумовий шланг. Колбу закріплюють у штативі і підігрівають воду до інтенсивного кипіння, потім нагрівання припиняють. Кипіння води припиняється. До шланга приєднують розріджу вальний штуцер насоса Шінца і відкачують пару. Ки-

піння відновлюється, а потім припиняється. Якщо відкачування продовжувати, то кипіння знову відновиться. Дослід доцільно закінчити так. Затиснувши шланг, відключають насос і, перекинувши колбу догори дном, закріплюють її у лапці штатива. Під колбу підставляють широку посудину. Після цього колбу поливають холодною водою. Кипіння води відновлюється. Особливості виконання дослідів даються у посібнику [26].

Приклади використання залежності температури кипіння рідини від тиску наведені в підручниках.

Вивчення властивостей пари закінчують розглядом питань вологості повітря. Спочатку варто показати, що в повітрі завжди є певна кількість водяної пари, яка й зумовлює його вологість. У чисту хімічну склянку за кімнатної температури кладуть шматочки льоду або сніг. Через деякий час поверхня склянки мутніє, а потім покривається краплинами води. Після цього розповідають учням про вплив вологості на процеси, які протікають на Землі, на велике значення вологості для здоров'я людини та вплив вологості на деякі технологічні процеси.

Для кількісної характеристики вологості повітря використовують поняття абсолютної та відносної вологості. Вказують, що **абсолютна вологість** показує кількість водяної пари в одиниці об'єму повітря.

**Відносну вологість**  $\varphi$  визначають як відношення тиску водяної пари в повітрі до тиску насиченої пари при тій же температурі:

$$\varphi = \frac{p}{p_n} \cdot 100\%,$$

де  $p$  – тиск водяної пари в даних умовах;

$p_n$  – тиск насиченої пари в цих умовах.

Користуючись тим, що водяна пара в повітрі підлягає дії закону Менделєєва-Клапейрона, можна формулу для розрахунку відносної вологості повітря подати в іншому вигляді:

$$\varphi = (\rho / \rho_n) \cdot 100\%,$$

де  $\rho$  – густина водяної пари в даних умовах;  
 $\rho_n$  – густина насиченої пари в цих умовах.

Зниження температури приводить до зростання відносної вологості повітря. При певній температурі водяна пара стає насиченою, починається її конденсація, з'являється роса. За відомою температурою точки роси можна визначити вологість повітря. У підручниках та збірниках задач є таблиці тисків і густини насиченої пари, які допомагають робити відповідні розрахунки. Якщо температура точки роси відома, то в таблиці можна знайти парціальний тиск пари в повітрі при цій температурі. З цієї таблиці знаходять також тиск насиченої пари при тій самій температурі та за формулою  $\varphi = \frac{P}{P_n} \cdot 100\%$  визначають відносну вологість повітря.

Прилади для визначення відносної вологості повітря – *гігрометр та психрометр* – досить повно описані в підручниках, тому зупинятися на них не будемо. Тут варто підкреслити, що останній прилад дає найвірогідніші результати внаслідок специфіки своєї будови.

Якщо при засвоєнні теоретичного матеріалу про вологість повітря учні не відчувають затруднення, то при розв'язуванні задач учні відчувають певні труднощі. Це пов'язане з тим, що рівняння Менделєєва-Клайперона можна застосовувати як для ненасиченої так і насиченої пари (якщо нехтувати взаємодією між молекулами). При зміні тиску, температури чи об'єму насиченої пари змінюється її маса, тому доцільніше користуватися рівнянням стану у вигляді  $p = \frac{\rho}{M} RT$ . Приступаючи до розв'язування задач потрібно перш за все з'ясувати, насичена пара чи ні.

### ► Типові задачі

– Чи можна всмоктувальним насосом підняти воду, що кипить?

– Як змінюється абсолютна і відносна вологість повітря при його нагріванні?

– Відносна вологість повітря ввечері при  $16^{\circ}\text{C}$  дорівнює 55 %. Чи випаде роса, якщо температура вночі знизиться до  $8^{\circ}\text{C}$ .

– При охолодженні повітря від  $20^{\circ}\text{C}$  до  $7^{\circ}\text{C}$  з кожного його кубометра виділилось 8 г води. Визначити парціальний тиск пари та відносну вологість повітря.

## 2. Методика вивчення властивостей поверхні рідини

У цій темі вивчаються явища на межі рідини з газом і твердим тілом. При вивченні питань теми поглиблюються поняття про молекулярні сили, радіус їх дії, про використання та врахування міжмолекулярних сил у деяких галузях народного господарства та прикладних науках, що і визначає їх значення.

Для кращого розуміння учнями навчального матеріалу корисно повторити залежність сил молекулярної взаємодії від відстані між молекулами, а також порівняти загальні властивості рідин з відомими властивостями газів. Молекули газу від удару до удару рухаються прямолінійно, а молекули рідини здійснюють коливання навколо тимчасових положень рівноваги і час від часу переміщуються з одного місця в інше. Унаслідок цього рідини плинні і набувають форми посудини, в якій вони знаходяться. Відстані між молекулами рідини значно менші, ніж у газах, вони розміщені близько одна біля одної. Тому рідина на відміну від газу зберігає свій об'єм, а на межі з газом або паром утворює вільну поверхню, яка має особливі властивості. Деякі з цих властивостей потрібно продемонструвати.

а) Поверхневий шар рідини має властивість скорочуватись. Для підтвердження цього беруть дротяну рамку з ручкою і перекладиною, яка може вільно рухатися уздовж двох протилежних сторін рамки [26, с. 96]. Рухому перекладину розміщують посередині рамки, яку опускають у мильний розчин, підтримуючи перекладину за нитку. Після цього рамку виймають і відпускають нитку. Мильна плівка скорочується і підтягує перекладину до краю рамки. Якщо потягнути нитку, то мильна плівка буде розтягуватись. Досить переконливим є дослід з поплавцем, до якого прикріплене дротяне кільце [26, с. 96]. Скляну посудину наповнюють щертв водою і опускають у неї поплавець. Дротяне кільце має знаходитись над водою на невеликій відстані. Кінцем скляної палички або піпетки натискають на кружальце, поплавець занурюється в воду так, щоб кільце було нижче рівня води. Обережно відпускають поплавець і спостерігають, що він залишається під водою.

Далі приступають до пояснення властивостей поверхневого шару рідини. Молекули всередині рідини притягуються сусідніми молекулами з усіх боків, тому молекулярні сили притягання компенсуються, рівнодійна цих сил в середньому дорівнює нулю.

У інших умовах знаходяться молекули на поверхні рідини [21]. Кожна молекула поверхневого шару притягується сусідніми молекулами вглиб рідини. Взаємодією молекул поверхневого шару рідини з молекулами газу або пари над її поверхнею нехтуємо. Під дією цих сил молекули поверхневого шару втягуються всередину рідини, кількість молекул на поверхні зменшується, площа поверхні рідини скорочується. Оскільки всі молекули не можуть перейти вглиб рідини, то на поверхні їх залишається стільки, що площа поверхні рідини буде мінімальною при заданому об'ємі. Рідини у вільному стані під дією тільки молекулярних сил набувають сферичної форми, за якої площа поверхні мінімальна. Сферичну форму краплин рідини, що перебувають тільки під дією молекулярних сил, демонструють у досліді Плато. Різні варіанти цього досліді описані у посібниках з демонстраційного експерименту, наприклад [26, с. 99].



Оскільки на молекули поверхневого шару рідини вглиб рідини діють незрівноважені сили, то, здавалось би, густина поверхневого шару має бути більша, ніж внутрішніх шарів. Але це не так. Концентрація молекул у поверхневому шарі менша, ніж у глибині. Середня відстань між молекулами поверхневого шару більша, ніж всередині рідини. Усередині рідини молекули коливаються навколо середніх положень, зміщуючись на однакову відстань у будь-якому напрямі. Молекула ж на поверхні рідини взаємодіє з молекулами, що знаходяться від неї по суті з одного боку, оскільки сили взаємодії молекул несиметричні, то молекули поверхневого шару, коливаючись навколо положення рівноваги, можуть відхилятися від нього і від рідини в перпендикулярному до її поверхні напрямі на більшу відстань, ніж наближатися. Це й пояснює те, що середні відстані між молекулами поверхневого шару більші, ніж всередині рідини. Для переходу молекули з глибини в поверхневий шар необхідно виконати роботу проти сил притягання. Тому молекули поверхневого шару мають більші потенціальні енергії, ніж молекули в глибині рідини.

Молекули поверхневого шару взаємодіють з усіма своїми сусідами, тому в поверхневому шарі виникають направлені вздовж поверхні рідини сили, які намагаються скоротити цю поверхню. Вони називаються *силами поверхневого натягу*. Для введення поняття поверхневого натягу знову звертаються до досліду з рамкою, підкреслюють, що сили поверхневого натягу перпендикулярні до перекладини. Зрозуміло, що сила поверхневого натягу пропорційна довжині перекладини. Відношення сили поверхневого натягу, що діє на перекладину з боку однієї поверхні плівки на перекладину, називають поверхневим натягом:

$$\sigma = \frac{F}{l}.$$

Поверхневий натяг вимірюється у ньютонках на метр  $\left(\frac{H}{м}\right)$ .

Поверхневому натягу можна дати й енергетичне трактування.

Молекули поверхневого натягу мають додаткову потенціальну енергію  $U_n$ , яку називають поверхневою енергією. Поверхневу енергію одиниці площі поверхні називають поверхневим натягом, тобто  $\sigma = \frac{U_n}{S}$ .

З учнями аналізують таблицю поверхневого натягу різних рідин та вказують на його залежність від температури. Практика показує, що часто деякі учні вважають поверхню рідини реальною пружною плівкою. Учням потрібно пояснити, що ніякої плівки на поверхні не існує. Поверхня рідини не має пружності. При розтягу гумової плівки збільшується віддаль між її молекулами і сила пружності зростає. Поверхня ж рідини збільшується внаслідок переходу в поверхневий шар нових молекул із глибини, а не внаслідок збільшення відстані між ними у поверхневому шарі. Якщо поверхня рідини скорочується, то молекули переходять з поверхневого шару всередину рідини.

При вивченні явищ змочування і незмочування потрібно спиратись на факти, які відомі учням, та на досліди, які легко поставити фронтально. Крапля води розтікається по чистій обезжиреній поверхні скляної пластинки, а на парафіновій пластинці набирає форми, близької до сферичної. Рідина, яка тонкою плівкою розтікається по поверхні твердого тіла, називається **змочуючою**, а якщо збирається у краплю – **незмочуючою**.

Для пояснення цих явищ потрібно врахувати сили притягання молекул рідини одна до одної та сили притягання між молекулами рідини і твердого тіла. Якщо сили притягання рідини між молекулами більші, ніж сили притягання молекул рідини і твердого тіла, то рідина збирається у краплю, має місце явище незмочування. Якщо ж навпаки, то рідина розтікається по поверхні твердого тіла, спостерігається явище змочування.

Змочування і незмочування проявляються у викривленні поверхні рідини біля стінок посудини. Увігнутий та опуклий меніск зображають на дошці й роблять необхідні пояснення.

Поводження рідини у вузьких трубках – **капілярах** залежить від того, змочує рідина тверде тіло матеріалу трубки чи ні.

Спочатку демонструють явище капілярності за допомогою набору капілярних трубок, який є у фізичних кабінетах.

Техніка демонстрації описана в посібнику [26, с. 105]. Оскільки використання ртуті у школах заборонено, то прилад покривають зсередини тонким шаром парафіну і заповнюють водою. Зображення трубок проєктують на екран. Учні бачать дивне для них явище, поверхня рідини в сполучених посудинах знаходиться на різних рівнях. У чистих капілярах вода підіймається вище рівня в широкій посудині, а в капілярах, покритих парафіном, опускається нижче. Пояснюють спостережувані явища та виводять формулу для розрахунку висоти підняття

$$\text{рідини в капілярах } h = \frac{2\sigma}{\rho g r}.$$

У цій формулі  $r$  – радіус кривизни сферичної поверхні рідини. Якщо меніск напівсферичний, то його радіус дорівнює радіусу капіляра. Говорячи про значення капілярності у природі чи на виробництві, можна обмежитись традиційними прикладами зменшення капілярності ґрунту шляхом його розрихлення для запобігання швидкому висиханню чи навпаки, ущільнення його для прискорення сходження деяких рослин в умовах недостатнього зволоження ґрунту.

Розв'язуючи задачі на поверхневий натяг потрібно в першу чергу звертати увагу на суть явищ, про які йде мова в задачі. Якщо у задачі йде мова про тонкі плівки рідини, потрібно враховувати, що шар рідини має дві поверхні, сили поверхневого натягу діють уздовж кожної з них.

### ► Типові задачі

– Чому волоски малярського пензлика у воді розходяться, а при вийманні з води злипаються?

– До поверхні рідини густиною  $\rho$  і з коефіцієнтом поверхневого натягу  $\sigma$  дотикаються вертикально розміщеним капіляром з внутрішнім радіусом  $r$ . Рідина змочує капіляр. Знайти: висоту підймання рідини в капілярі; потенціальну енергію рідини в капілярі; роботу сил поверхневого натягу під час піднімання

рідини. Пояснити, чому потенціальна енергія рідини в капілярі дорівнює роботі сил поверхневого натягу.

– Знайти коефіцієнт поверхневого натягу рідини, якщо петля із гумової нитки довжиною  $l$  і жорсткістю  $k$ , покладена на плівку цієї рідини, розтягнулась по колу радіуса  $R$  після того, як плівка була проколота всередині петлі.

### 3. Методика вивчення властивостей твердих тіл

У цій темі розглядаються механічні властивості твердих матеріалів, відомості про будову кристалів, принцип їх щільної упаковки, сили міжмолекулярної взаємодії, механізм деформації, дефекти в кристалах. Матеріал теми має не тільки пізнавальний характер, але потрібний для розуміння навчального матеріалу наступних тем, зокрема, електричної провідності металів та напівпровідників.

Об'єм навчального матеріалу, що стосується великої за обсягом галузі техніки, обмежений програмою, а тому має, в основному, описовий характер. Сучасним і актуальним у темі є матеріал про природне і штучне утворення кристалів та поняття про рідкі кристали.

Пристаюючи до вивчення матеріалу потрібно спиратись на знання, уже відомі учням, зокрема з хімії. Спочатку пригадують, що однією з найважливіших властивостей і ознак твердих тіл (на відміну рідин) є збереження об'єму і форми. Для пояснення такої властивості потрібно порівняти густини однієї й тієї ж речовини в рідкому і твердому станах. Те, що густина речовини у твердому стані мало відрізняється від густини в рідкому стані, свідчить, що відстані між молекулами речовини у твердому стані приблизно такі, як і в рідкому. Але рідина і тверде тіло відрізняються співвідношенням між потенціальною енергією взаємодії молекул і кінетичною енергією цих молекул. Якщо для рідин ці енергії одного порядку  $E_p \sim E_k$ , то для твердого тіла  $E_p \gg E_k$ . Причину такої відмінності можна пояснити своєрідним

розташуванням молекул. У твердих тілах у розташуванні молекул має місце далекий порядок, за якого частинки твердого тіла розміщуються впорядковано і утворюють просторову кристалічну ґратку. У рідинах же спостерігається ближній порядок.

Тверді тіла поділяються на кристалічні й аморфні. У фізиці твердими тілами вважають лише кристалічні тіла. Аморфні тіла розглядають як дуже в'язкі рідини. Кристалічні тіла мають певну температуру плавлення, в аморфних речовин в'язкість при підвищенні температури поступово зменшується, вони не мають певної температури плавлення.

У багатьох випадках тверде тіло може бути одним кристалом, який для цього випадку називають монокристалом. У монокристалах спостерігається анізотропія фізичних властивостей. У більшості твердих тіл анізотропія властивостей не проявляється оскільки вони переважно мають полікристалічну структуру. У посібнику [26] описані досліди, демонстрації моделі кристалічної ґратки, твердого тіла й рідини, анізотропії теплопровідності й механічних властивостей.

Цікавим для учнів може бути повідомлення вчителя про те, що багато природних кристалів на Землі утворилося при охолодженні магми. Спочатку утворювались кристали тих речовин, температура кристалізації яких досить висока, далі утворювались кристали речовин, що мають нижчу температуру кристалізації. Якщо магма остигала повільно, то утворювались кристали великих розмірів. За швидкого остигання магми утворювались дрібнозернисті мінерали. Багато мінералів утворилось з перенасичених водних розчинів, зокрема кухонна сіль  $\text{NaCl}$ .

Деякі галузі народного господарства потребують великої кількості монокристалів, зокрема таких, що рідко зустрічаються в природі. Для задоволення потреб промисловості розроблено кілька способів вирощування монокристалів. Найбільш поширеними з них є: кристалізація з розплаву, кристалізація з розчину, кристалізація з газу. У посібнику [26] описано декілька демонстраційних дослідів для показу утворення і зростання кристалів. Багато монокристалів можна вирощувати з перенасичених розчинів, зокрема алюмокалієвого чи хромового галуна, мідного

купоросу, двохромовокислого калію та ін. Ці процеси проходять досить повільно, тому вирощування кристалів можна рекомендувати учням провести вдома. Вказівки можна взяти із згаданого вище посібника.

Розглядаючи властивості рідких кристалів потрібно вказати, що подібний стан є проміжним між рідиною і твердим тілом. Кристалами ці речовини можна назвати тому, що вони мають анізотропію оптичних і електричних властивостей. Проте для них діє умова про співрозмірність кінетичної та потенціальної енергій взаємодії молекул, яка властива для рідин.

Виклад питань про властивості твердих тіл і матеріалів, зокрема про види деформацій супроводжують простими дослідженнями, які описано в посібнику для демонстраційного експерименту [26, с. 120-122]. Завершують вивчення цих питань розглядом діаграми розтягу.

Важливим моментом у вивченні механічних властивостей твердих тіл є вивчення закону Гука. При його вивченні застосовують методичний підхід, який дозволяє познайомити учнів з загальнішою формою запису цього закону. У законі Гука, який вивчався в курсі механіки у вигляді  $F_{np} = k\Delta l$ , коефіцієнт  $k$  характеризує механічні властивості не речовини, а даного твердого тіла. У зв'язку з цим ставлять завдання знайти таку форму запису закону, в якому було б відображено механічні властивості матеріалу, з якого виготовлено технічну деталь. З цією метою спочатку вводяться такі поняття як механічна напруга  $\sigma$  та відносне видовження  $\varepsilon$ . Тоді у формулюванні закону Гука буде твердження, що для певного матеріалу механічна напруга пропорціональна відносному видовженню:  $\delta = E\varepsilon$ .

Після запису закону Гука у вигляді  $\frac{F}{S} = \frac{\Delta l}{l} E$  потрібно з'ясувати фізичний зміст модуля пружності  $E$  та встановити його зв'язок з жорсткістю тіла  $k$  у іншій формі запису закону. Для цього закон Гука записують у вигляді  $F = k\Delta l$ . Співставивши два вирази для закону Гука, можна записати, що  $E = k \frac{l}{S}$ .

$$\text{Звідси } k = \frac{ES}{l}.$$

Якщо  $l = 1$  м,  $S = 1$  м<sup>2</sup>, то  $E$  чисельно дорівнює  $k$ . Отже, модуль пружності чисельно дорівнює жорсткості тіла кубічної форми з ребром один метр, якщо сила діє перпендикулярно до однієї з граней, а механічна напруга рівномірно розподілена в тілі.

Розрахункові задачі на властивості твердих тіл зводяться до застосування поняття напруги, відносного видовження, закону Гука та на застосування поняття границі міцності. Крім розрахункових потрібно розв'язувати і **якісні задачі**.

### ► Типові задачі

– Чому кристал кухонної солі при ударі по ньому молотком розколюється на шматки різного розміру, які мають завжди форму паралелепіпеда з прямими кутами?

– Якого діаметра має бути сталевий стрижень гака підіймального крана, розрахованого на підіймання вантажу масою  $m = 8 \cdot 10^3$  кг, щоб він забезпечував шестикратний запас міцності? Границя міцності сталі  $\sigma_c = 10^8$  Па.

– Для вимірювання глибини моря з теплохода спускають за борт однорідний сталевий трос. Яку максимальну глибину можна визначити таким способом? Границя міцності сталі

$\sigma_c = 5 \cdot 10^8$  Па, густина сталі  $\sigma_1 = 7850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , густина морської

води  $\sigma_2 = 1030 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .



### Питання для самоконтролю

1. Яка послідовність викладу навчального матеріалу в підручниках та програмі з фізики?
2. Як продемонструвати незалежність тиску насиченої пари від об'єму при сталій температурі?
3. Чому тиск насиченої пари при збільшенні температури зростає швидше, ніж тиск ідеального газу?
4. Як пояснити учням залежність температури кипіння рідини від зовнішнього тиску?
5. Як пояснити учням, що концентрація молекул у поверхневому шарі рідини менша, ніж всередині?
6. Як показати еквівалентність силового та енергетичного трактування поверхневого натягу?
7. Чому не можна ототожнювати властивості поверхні рідини з властивостями гумової плівки?
8. Як продемонструвати і пояснити анізотропію монокристалів?
9. Як пояснити відмінність закону Гука у вигляді  $\sigma = E \varepsilon$  від  $F_x = -kx$ ?



---

## Розділ III

# ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

### Лекція 8.

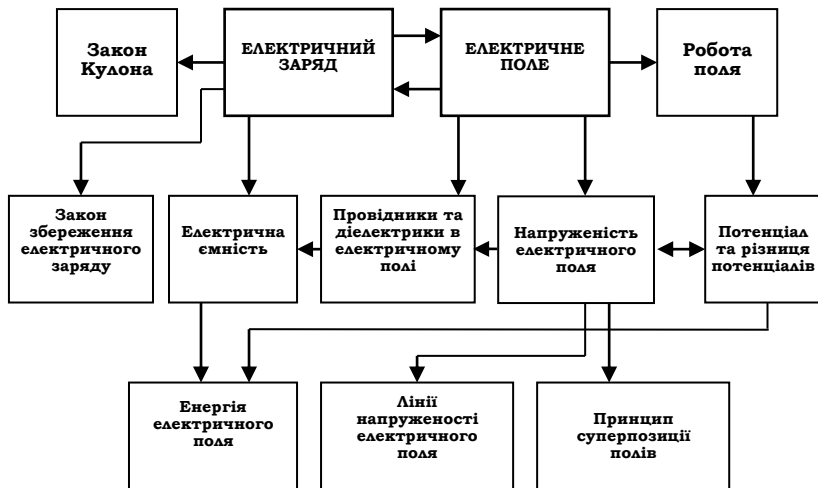
#### Методика вивчення теми “ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ”

##### 1. Науково-методичний аналіз змісту і структури теми

Вивчення теми „Електричне поле” слід розглядати як важливий етап у формуванні уявлень про електромагнітне поле і як перший крок в ознайомленні з електромагнітною теорією Д. Максвелла. *Основне завдання теми – дати учням науково-достовірні знання про електричний заряд, електричне поле і його характеристики.*

Первинне знайомство з поняттями електричного поля та електричного заряду здійснюється в основній школі в темі “Електричні явища”. У старшій школі початковій уявлення про електричне поле, які були сформовані на першому ступені навчання на якісному рівні, суттєво розширюються і поглиблюються введенням кількісних його характеристик.

### Структурно-логічна схема теми



У змісті теми можна виділити чотири основні групи питань.

1. Поняття електричного заряду. Властивості електричного заряду. Закон збереження електричного заряду. Закон Кулона.

2. Електричне поле та його характеристики: а) напруженість поля (лінії напруженості, принцип суперпозиції полів); б) робота поля під час переміщення заряду, потенціал, різниця потенціалів. Речовина в електричному полі.

3. Електроємність. Ємність плоского конденсатора.

4. Енергія електричного поля.

## 2. Основні поняття теми та їх науково-методичний аналіз

Основними поняттями теми є *електричний заряд та електричне поле*. Іншими важливими поняттями є *напруженість та лінії напруженості електричного поля, потенціал електричного поля, різниця потенціалів, електроємність*.

Поняття *електричного заряду* є одним із фундаментальних понять електродинаміки, формуванню якого слід приділити особливу увагу. У сучасній фізиці не існує означення електричного заряду, яке б зводилось до простіших понять, тому формувати уявлення про нього слід поступово, разом з уведенням поняття електричного поля.

Електричний заряд означають як джерело електромагнітного поля, пов'язане з матеріальним носієм, та як внутрішню характеристику елементарної частинки, що визначає її електромагнітну взаємодію [33, с. 864].

Перш за все, необхідно досягти розуміння того, що електричний заряд характеризує властивість частинок матерії певним чином взаємодіяти з електромагнітним полем.

Ця взаємодія особлива – її інтенсивність у  $10^{39}$  разів більша, ніж гравітаційної. Далі на основі демонстраційного експерименту слід розглянути такі властивості електричного заряду, як подільність, дискретність, інваріантність та його збереження у замкнених системах. Також, необхідно на основі досліду Міллікена ввести поняття елементарного заряду.

У ході формування уявлень про електричні заряди та їх взаємодію, значну увагу слід приділити фундаментальним фізичним дослідам – Кулона та Міллікена, оскільки вони відіграють базову роль не лише в науці, а й у навчанні.

Уведення поняття електричного поля базується на понятті близькодії: електричні заряди взаємодіють не безпосередньо, а через “посередника”, яким виступає особливий вид матерії – електричне поле. Оскільки дати компактне і вичерпне означення електричного поля, як й електричного заряду, неможливо вна-

слідок його первинності, на даному етапі слід обмежитись таким формулюванням: *електричне поле – це особливий вид матерії, за допомогою якого здійснюється взаємодія між тілами, що мають електричний заряд.*

Необхідно пам'ятати, що введення поняття статичного електричного поля та його характеристик слід здійснювати у контексті формування уявлень про єдине електромагнітне поле, тому слід звернути увагу на ретельне з'ясування його властивостей: матеріальність, дію на електричні заряди, нескінченність, потенціальність, велику швидкість поширення, енергію.

### **3. Навчальний фізичний експеримент**

#### **Демонстрації**

Будова і дія електрометра [9, с. 190]. Закон Кулона [9, с. 197; 24, с. 20]. Електричне поле заряджених кульок [9, с. 199; 24, с. 23]. Електричне поле двох заряджених пластин [9, с. 199; 24, с. 24]. Провідники в електричному полі [9, с. 192; 24, с. 25]. Будова і дія конденсаторів постійної і змінної ємності [9, с. 205; 24, с. 28]. Залежність ємності конденсатора від площі пластин, відстані між ними та діелектричної проникності середовища [9, с. 204; 35, с. 145]. Енергія зарядженого конденсатора [9, с. 209; 35, с. 151; 24, с. 33].

Демонстраційний експеримент з теми „Електричне поле” в цілому добре розроблений, але організація його має низку специфічних особливостей: 1) обладнання повинно бути заздалегідь підготовленим, вичищеним від пилу і бруду та просушеним (наприклад, за допомогою конвектора); 2) вологість у приміщенні кабінету фізики повинна бути якнайнижчою; 3) демонстрації з цієї теми вимагають дуже ретельної підготовки (особливо це стосується демонстрації закону Кулона): на демонстраційному столі не повинно бути зайвих приладів, металеві корпуси приладів, штативи повинні бути заземленими; 4) під час проведення дослідів з електростатики слід час від часу знімати статичний заряд з тіла демонстратора (шляхом дотикання до провідників заземлення); 5) у випадку неможливості створення в

навчальному приміщенні належних умов, демонстрацію закону Кулона варто здійснити за допомогою віртуальної моделі.

Комп’ютерне моделювання є доречним і при ознайомленні з дослідями Йоффе та Міллікена.

Виконання фронтальних лабораторних робіт у ході вивчення теми програмою середньої школи не передбачене. Лабораторні роботи з даної теми можливі під час виконання фізичного практикуму, наприклад з визначення ємності конденсатора, вивчення паралельного та послідовного з’єднання конденсаторів, або залежності енергії конденсатора від його параметрів.

#### **4. Методика вивчення основних питань теми**

Вивчення основних питань теми може здійснюватись різними шляхами. Один із них може бути таким.

Перш за все, необхідно провести систему дослідів з електризації з метою з’ясування механізму електризації тіл та створення в учнів узагальненого образу електрично зарядженого тіла. На цьому етапі в нагоді буде залучення знань, отриманих на першому ступені навчання.

Розглядають електризацію різнорідних тіл тертям, механічним ударом, простим дотиком і роблять висновок, що електризація взаємодіючих тіл відбувається при контакті їх поверхонь. При цьому тіла набувають нової властивості – певним, особливим чином взаємодіяти. Саме специфічна взаємодія наелектризованих тіл є ознакою наявності електричного заряду. Наелектризовані тіла можуть як притягуватись, так і відштовхуватись. Із цього роблять висновок про існування двох видів електричного заряду – позитивного та негативного. На досліді показують, що однойменно заряджені тіла відштовхуються, різнойменно заряджені – притягуються.

Потім на основі експерименту формують уявлення про закон збереження електричного заряду. Для цього ебонітову та плексигласову пластинки взаємно електризують і по чергово підносять до двох електрометрів, які покажуть наявність на них

однакового за значенням заряду. Якщо електрометри з'єднати дротиною, стрілки обох приладів падають на "0", з чого можна зробити висновок, що за значенням різнойменні заряди пластин є однаковими.

Вивчення закону Кулона здійснюється, як правило, лише в теоретичному плані. Хоча демонстрація закону Кулона й передбачена програмою, об'єктивні труднощі її організації вимагають, як уже було сказано вище, звернення до засобів комп'ютерного моделювання, або інших засобів унаочнення.

На основі аналізу досліду Кулона вводять вираз для обчислення кулонівської сили:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Найбільш повне формулювання закону Кулона доцільно дати таке: сила взаємодії між двома точковими нерухомими електрично зарядженими тілами у вакуумі пропорційна значенню їх зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані між ними.

$$\text{Коефіцієнт в системі СІ: } k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}.$$

Якщо записати закон Кулона, врахувавши  $k$  матимемо:

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

Слід звернути увагу учнів на те, що вираз у знаменнику відображає собою сферичну симетрію електричної сили (однакова сила діє на пробний заряд у кожній точці, рівновіддаленій від заряду).

Оскільки закон Кулона був сформульований на основі принципу далекодії, згідно якого заряджені тіла діють одне на одного безпосередньо, через пустоту, необхідно зупинитись на сучасному трактуванні електромагнітної взаємодії на основі уявлень про близькодію. Саме принцип близькодії передбачає існування особливого виду матерії – електричного поля. Елект-

ричне поле матеріальне, взаємодіє з електричними зарядами, має енергію і не має меж.

Силова дія електричного поля характеризується вектором напруженості  $\vec{E}$ . Це поняття вводиться наступним чином. Нехай електричне поле створюється точковим зарядом  $q^*$ . На пробний заряд  $q$ , що знаходиться в деякій точці  $A$ , буде діяти сила  $F$ . Помістивши у цю ж точку заряд  $2q$ , переконаємося, що на нього буде діяти сила  $2F$  і т.д.

Відношення сили, що діє на заряд, до значення пробного заряду в кожному випадку залишається сталим:

$$\frac{F}{q} = \text{const},$$

тому точку поля  $A$  можна характеризувати певною фізичною величиною – **напруженістю електричного поля**:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}.$$

Враховуючи закон Кулона, можна отримати вираз для обчислення **напруженості електричного поля точкового заряду  $q^*$**  на відстані  $r$  від нього:

$$E = \frac{F}{q} = k \frac{qq^*}{qr^2} = k \frac{q^*}{r^2}.$$

Після введення поняття напруженості електричного поля як величини векторної, необхідно розглянути принцип суперпозиції полів, який можна сформулювати так: *електричні поля не взаємодіють; напруженість електричного поля системи заряджених тіл у будь-якій точці дорівнює векторній сумі напруженостей полів окремих тіл у цій точці.*

У математичній формі цей принцип записується так:

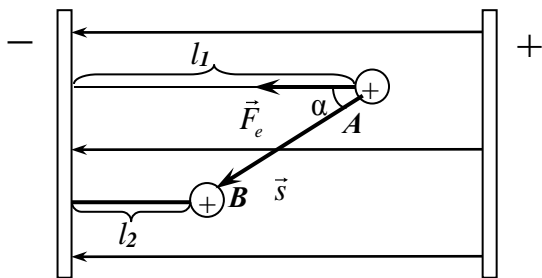
$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n.$$

Далі необхідно проілюструвати принцип суперпозиції полів, розв'язавши задачу відповідного типу.

Інша важлива характеристика електричного поля – потенціал. Його введення можна почати з експерименту та введення поняття роботи електричного поля з переміщення зарядженого тіла.

Дві пластини від моделі плоского конденсатора з'єднують із джерелом високої напруги. Між пластинами розташовують легеньку гільзу з металевої фольги, підвішену на довгій нитці. Якщо гільзу відвести від положення рівноваги, щоб вона доторкнулась до однієї із пластин, то вона буде здійснювати коливальний рух між пластинами до того часу, доки буде існувати електричне поле. Отже, електричне поле може виконувати роботу.

Роботу електричного поля можна розрахувати. Нехай заряджене тіло перемістилось під дією електричного поля з точки  $A$  в точку  $B$ , як це показано на малюнку (мал. 29).



Мал. 29

Тоді:  $A = F s \cos \alpha$ .

Але:

$$F = qE; \cos \alpha = \frac{l_1 - l_2}{s}.$$

Тому:  $A = qE (l_1 - l_2)$ .



Важливо показати учням, що робота електричного поля з переміщення зарядженого тіла не залежить від форми траєкторії. Провівши аналогію з гравітаційним полем (наприклад, як у [18, с. 136]), пояснюють, що електростатичне поле потенціальне і його робота може бути виражена через зміну потенціальної енергії зарядженого тіла:

$$A = -qE(l_2 - l_1) = -(qEl_2 - qEl_1) = -(W_{p2} - W_{p1}),$$

де  $W_p = qEl$  – потенціальна енергія зарядженого тіла в електричному полі.

Слід пояснити учням, що гільза, перебуваючи в електричному полі, має потенціальну енергію, пропорційну значенню її заряду. Тому відношення її потенціальної енергії до значення заряду буде величиною сталою в даній точці поля.

Скалярна фізична величина, яка є енергетичною характеристикою електричного поля і дорівнює відношенню потенціальної енергії зарядженого тіла в електричному полі до його заряду, називається **потенціалом**

$$\varphi = \frac{W_p}{q},$$

де  $W_p$  – потенціальна енергія зарядженого тіла;

$q$  – заряд тіла.

Далі слід показати учням, що потенціал точкового зарядженого тіла можна визначити за таким виразом:

$$\varphi = k \frac{q}{r}.$$

На поняття потенціалу поширюється принцип суперпозиції. *Потенціал точки, в якій діють поля кількох заряджених тіл, дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів кожного з них.* При цьому вважається, що потенціал поля негативно зарядженого тіла від'ємний.

Робота при переміщенні зарядженого тіла в електричному полі може бути виражена через зміну його потенціальної енергії, а, отже, і через зміну потенціалу:

$$A = -(W_{p2} - W_{p1}) = -(q\varphi_2 - q\varphi_1) = -q(\varphi_2 - \varphi_1).$$

Якщо одержаний вираз переписати у вигляді  $A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$ , то у правій частині отримаємо різницю потенціалів, яку вважають окремою фізичною величиною:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}.$$

Фізична величина, яка характеризує енергетичний стан поля і дорівнює відношенню роботи з переміщення зарядженого тіла з однієї точки поля в іншу до значення заряду, називається **різницею потенціалів**.

Після введення поняття різниці потенціалів слід розповісти учням, що для електростатичного поля різниця потенціалів співпадає з електричною напругою, тобто:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U.$$

Електричне поле матеріальне. Доказом матеріальності електричного поля є взаємодія його з речовиною, внаслідок якої відбувається електризація тіл.

Явище електризації пояснюють на основі електронної теорії та вже сформованих уявлень про будову речовини. Звертають увагу на відмінність внутрішньої будови і механізмів електризації металевих провідників та діелектриків у зовнішньому електричному полі – електростатичну індукцію та поляризацію, відповідно. Внаслідок електростатичної індукції протилежні кінці металевого провідника уздовж ліній напруженості поля набувають протилежного за знаком заряду. Напруженість внутрішнього електричного поля, створеного розподіленими зарядами, за своїм значенням дорівнює напруженості зовнішнього електричного поля. **У середині металевого провідника напруженість електричного поля, згідно принципу суперпозиції, дорівнює нулю.**

Діелектрики, на відміну від провідників, не мають вільних носіїв заряду. Якщо діелектрик потрапляє в електричне поле, то змін зазнають самі молекули – у полярних діелектриках відбувається переорієнтація молекул, а в неполярних – їх “деформація”, що призводить до появи внутрішнього електричного поля, напрям напруженості якого протилежний до напруженості зовнішнього поля. Але, на відміну від металів, у діелектриках напруженість внутрішнього поля не дорівнює напруженості зовнішнього, вона є дещо меншою. Згідно принципу суперпозиції, *внутрішнє електричне поле діелектрика послаблює зовнішнє.*

Різні діелектричні матеріали по-різному послаблюють зовнішнє електричне поле. Для характеристики електричних властивостей діелектриків користуються фізичною величиною, яку називають діелектричною проникністю. Вона показує, у скільки разів напруженість електричного поля в діелектрику менша, ніж поза ним:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E},$$

де  $\varepsilon$  – діелектрична проникність речовини;

$E$  – напруженість електричного поля в діелектрику;

$E_0$  – напруженість електричного поля поза діелектриком.

На завершення слід навести приклади значень діелектричної проникності різних діелектриків та ознайомити учнів з електричними аналогами постійних магнітів – електретами.

Поняття електроємності можна ввести експериментальним шляхом, на основі спостереження за зміною показів двох електрометрів із закріпленими порожнистими кулями різних розмірів.

Від електрофорної машини за допомогою кульки на ізоляційній ручці однаковий заряд декілька разів передають порожнистим кулям. Звертають увагу учнів, що потенціали порожнистих куль зростають пропорційно до заряду, але потенціал кулі більшого радіуса зростає повільніше. Величина  $\frac{Q}{\varphi}$  не

залежить від заряду, а визначається лише геометричними розмірами провідника.

Фізичну величину, яка описує електричні властивості окремого провідника і чисельно дорівнює відношенню його заряду до потенціалу, називають *електроємністю* провідника:

$$C = \frac{Q}{\varphi}.$$

Оскільки поняття окремого провідника є ідеалізацією, частіше мають справу з системою з двох провідників (обкладок), розділених шаром діелектрика – конденсатором. Учням потрібно пояснити, що така система дозволяє накопичувати значний електричний заряд при незначних різницях потенціалів. Конденсатори є поширеними елементами в електро- та радіотехніці. Електрична ємність конденсатора визначається його геометричними характеристиками та видом діелектрика між провідниками. Найпростішим є плоский конденсатор, у якого обкладки – металеві пластини. Його ємність визначається за таким виразом:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d},$$

де  $S$  – площа пластин;

$d$  – відстань між пластинами;

$\varepsilon$  – діелектрична проникність діелектрика;

$\varepsilon_0$  – електрична стала.

Заряджений конденсатор має енергію, що можна проілюструвати за допомогою наступного досліду. Конденсатор ємністю 2000 мкФ заряджають від джерела струму напругою 12 В і під'єднують до електричної лампочки від кишенькового ліхтаря. Короткочасний яскравий спалах світла є наслідком нагрівання нитки розжарення лампочки під час розрядження конденсатора через неї.

Для виведення формули розрахунку енергії зарядженого конденсатора потрібно використати знання учнів про те, що напруга на пластинах конденсатора пропорційна заряду на

пластинах. Тоді робота, виконана при заряджанні конденсатора буде дорівнювати  $A = \frac{qU}{2}$ .

Якщо врахувати, що  $q = CU$ , то енергія електричного поля зарядженого конденсатора  $W = A = \frac{CU^2}{2}$ .

Ця енергія дорівнює роботі, яку виконає поле при зближенні пластин впритул.

Вирази:  $W = \frac{q^2}{2c}$ ,  $W = \frac{CU^2}{2}$  варто запропонувати учням отримати самостійно.

Енергію електричного поля конденсатора можна виразити через напруженість електричного поля:

$$W = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} Sd.$$

Поділивши одержаний вираз на  $Sd$  – об'єм простору між пластинами, дістанемо енергію, що припадає на одиницю об'єму, тобто густину енергії:

$$\omega = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}.$$

## 5. Типові задачі

### ► На закон Кулона

Два позитивних точкових заряди  $q$  та  $2q$  знаходяться на відстані 10 мм і взаємодіють із силою  $7,2 \cdot 10^{-4}$  Н. Яке значення кожного із зарядів?

### ► На закон збереження електричного заряду

Дві однакові металеві кульки, які мали заряди  $q_1 = 2,5$  нКл та  $q_2 = -0,5$  нКл знаходяться на відстані 5 см. Їх приводять у дотик і віддаляють на вихідну відстань. Знайти силу взаємодії кульок до і після їх дотикання.

**►► На визначення напруженості електричного поля точкового заряду та зарядженої провідної сфери**

Накреслити графік залежності напруженості електричного поля металевій зарядженій сфері радіусом 3 см з поверхневою густиною заряду  $\sigma = 2 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Кл}}{\text{см}^2}$  від відстані від її центру.

**►► На застосування принципу суперпозиції полів**

У трьох вершинах квадрата зі стороною 10 см знаходяться однакові позитивні заряди по  $5 \cdot 10^{-9}$  Кл. Знайти напруженість електричного поля у четвертій вершині.

**►► На розрахунок роботи електричного поля при переміщенні електричного заряду**

У однорідному електричному полі з напруженістю  $5 \cdot 10 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$  переміщується заряд  $6 \cdot 10^{-9}$  Кл на відстань 10 см під кутом  $30^\circ$  до лінії напруженості електричного поля. Визначити роботу поля з переміщення заряду.

**►► На розрахунок потенціалу поля точкового заряду та зарядженої провідної сфери.**

Знайти потенціал електричного поля металевій сфері радіусом 3 см з поверхневою густиною заряду  $\sigma = 2 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Кл}}{\text{см}^2}$  на відстанях 2 см, 3 см та 10 см від її центру.

**►► На розрахунок ємності плоского конденсатора**

Яка ємність конденсатора у повітрі, якщо площа його пластин  $20 \text{ см}^2$ , а відстань між пластинами 0,1 мм? Яка напруга виникне на конденсаторі, якщо одній з пластин надати заряд  $q = 5 \cdot 10^{-9}$  Кл? Як зміниться ця напруга, якщо простір між пластинами конденсатора заповнити парафіном?

►► **На розрахунок енергії електричного поля конденсатора**

Конденсатор ємністю  $10 \text{ мкФ}$  зарядили до напруги  $10 \text{ В}$  і від'єднали від джерела струму. Якою є енергія електричного поля конденсатора? Якою стане енергія електричного поля цього ж конденсатора, якщо паралельно до нього під'єднати конденсатор ємністю  $30 \text{ мкФ}$ ?

**6. Організація контролю і обліку знань учнів**

Ефективним методом поточного контролю знань учнів та мотивації учіння під час вивчення цієї теми можуть бути невеликі за об'ємом фізичні диктанти, основною метою яких є контроль засвоєння фізичних понять теми, розуміння фізичного змісту явищ, процесів та фізичних величин.

Підсумкова контрольна робота повинна бути багатоваріантною, містити якісні і розрахункові задачі, охоплювати всі основні змістові блоки, виділені вище.



**Питання для самоконтролю**

1. Які зміст, структура та особливості вивчення теми?
2. Які основні поняття теми?
3. Як уводиться поняття електричного заряду?
4. Як уводиться поняття електричного поля?
5. Які особливості вивчення основних характеристик електричного поля?
6. Як підтвердити наявність енергії в електричного поля?
7. У чому полягає експериментальний шлях уведення поняття електроємності?

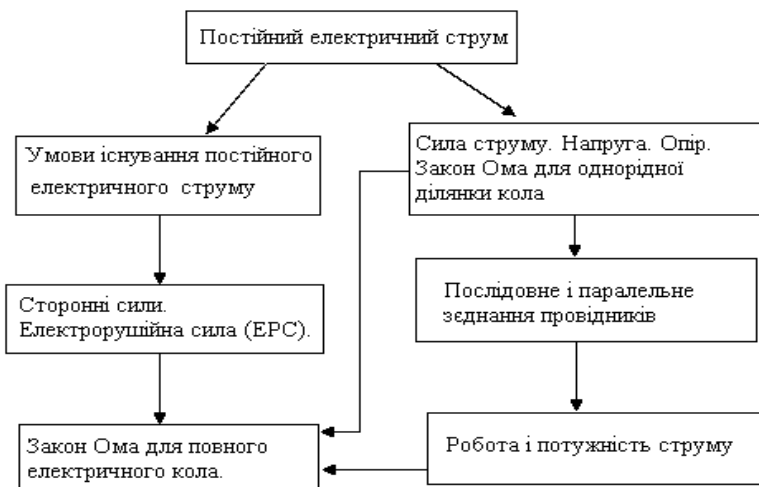
---

## Лекція 9.

### Методика вивчення теми “ЗАКОНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ”

#### 1. Науково-методичний аналіз змісту і структури теми

Зміст теми складають елементи електротехніки для кіл постійного струму. Традиційні зміст і структура теми показані на структурно-логічній схемі.



Більшість понять і закономірностей електротехніки постійного електричного струму вивчались у базовому курсі фізики, тому при вивченні теми “Закони постійного струму” у старшій школі потрібно спиратись на ці знання, повторити, уточнити і поглибити їх. Новими питаннями для десятикласників, що мають суттєве значення для розуміння закономірностей в колах



постійного струму, є з’ясування умов, необхідних для існування електричного струму, поняття стаціонарного електричного поля, сторонніх сил, електрорушійної сили та закон Ома для повного кола.

Вивчення теми сприяє розумінню учнями важливих напрямків розвитку народного господарства на основі його електрифікації та застосування радіоелектроніки практично в усіх його галузях, до використання електричної енергії на виробництві та в побуті. Отримані учнями знання служать базою для вивчення наступних тем розділу “Електродинаміка”.

## **2. Основні поняття теми та їх науково-методичний аналіз**

До основних понять теми, що не вивчались раніше, відносять стаціонарне електричне поле, джерело струму, сторонні сили, електрорушійна сила.

У випадку постійного струму у провіднику існує електричне поле, відмінне від електростатичного поля, його називають стаціонарним.

**Стаціонарне поле** – це електромагнітне поле постійного струму. Воно має дві складові: електричну і магнітну. Ці складові незалежні одна від одної і їх можна розглядати окремо. Вектор напруженості електричного поля не перпендикулярний до поверхні провідника, його можна розкласти на дві складові – перпендикулярну до поверхні провідника і повздовжню. Повздовжня складова напруженості створює напрямлений рух вільних заряджених частинок у провіднику. Стаціонарне електричне поле, як і електростатичне, потенціальне. Джерелом його є уявно нерухомі заряди у тому розумінні, що просторовий розподіл зарядів не змінюється у часі. Хоч заряди рухаються, але їх концентрація ніде не змінюється.

**Джерело струму** – це пристрій, який переносить позитивно заряджені частинки від точок з нижчим потенціалом до точок з вищим потенціалом. Але електричне поле буде існувати і в

джерелі струму, тому в ньому мають діяти сили, відмінні від електростатичних. Ці сили називаються *сторонніми*.

Енергетичною характеристикою джерела струму є *електрорушійна сила (ЕРС)*. ЕРС джерела струму визначається відношенням роботи сторонніх сил з переміщення позитивного заряду від негативного до позитивного полюса до значення цього заряду.

### **3. Навчальний фізичний експеримент**

#### **Демонстрації**

Закон Ома для ділянки кола [9, с. 216]. Розподіл струмів і напруг у колах з послідовним і паралельним з'єднанням провідників [24, с. 46]. Залежність сили струму від ЕРС джерела і повного опору кола [24, с. 43; 9, с. 224].

#### **Лабораторні роботи**

1. Визначення питомого опору провідника.
2. Послідовне й паралельне з'єднання провідників.
3. Визначення ЕРС та внутрішнього опору джерела струму.

### **4. Методика вивчення основних питань теми**

#### **А. Умови існування електричного струму. Стационарне електричне поле.**

Нагадуємо спочатку деякі основні поняття, що описують електричний струм. Взагалі під електричним струмом розуміють впорядкований рух (для постійного струму – напрямлений рух) заряджених частинок або тіл. Розрізняють струм провідності, інерційний та конвекційний струми. У даній темі вивчають струм провідності. Проходження струму в провідниках супроводжується магнітною, тепловою та хімічною діями.

Магнітна дія струму є універсальною, вона має місце для будь-якого струму, тепла дія струму відсутня у надпровідниках, хімічна дія спостерігається для струмів у розчинах та розплавах електrolітів.

Потрібно розрізняти напрям руху заряджених частинок (електронів, йонів) та напрям струму. За напрям струму беруть напрям руху вільних позитивно заряджених частинок.

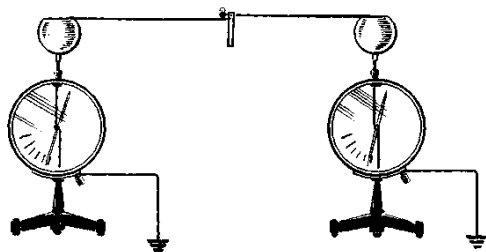
Інтенсивність дії струму може бути різною, тому для характеристики струму вводять поняття сили струму, яке характеризує швидкість перенесення заряду частинками через поперечний переріз провідника і визначається за формулою:

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

У Міжнародній системі одиниць сила струму вимірюється в амперах (А). Якщо сила струму з часом не змінюється, то струм називають постійним.

Розподіл струму у провіднику характеризується густиною струму  $j = \frac{I}{S}$ , яка є векторною величиною, напрям якої збігається з напрямом струму. Сила струму є скалярною величиною. Оскільки електричний струм – це напрямлений рух вільних заряджених частинок, то для існування струму перш за все потрібно, щоб існували вільні заряджені частинки (носії заряду). Вільні носії заряду під час напрямленого руху зіштовхується з молекулами, атомами та йонами провідника і втрачають частину своєї енергії.

Тому для підтримання їх неперервного напрямленого руху необхідно, щоб на них весь час діяли сили, тобто, щоб у провіднику існувало електричне поле. Обґрунтувати це положення на досліді можна таким чином. Беруть два електрометри і заряджають один із них до деякого потенціалу. Потім з'єднують електрометри провідниками, між якими як індикатор ввімкнена неоновна лампочка (мал. 30). Спалах лампочки свідчить (дослід проводять у затемненому приміщенні), що по ній пройшов короточасний струм. Електрометри виявляються зарядженими до однакового потенціалу, різниця потенціалів між ними дорівнює нулю, лампочка не світиться, струму в провіднику нема.



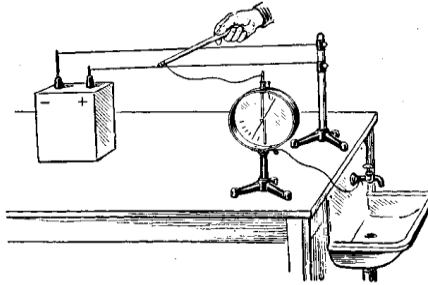
Мал. 30

Щоб струм у провіднику існував тривалий час, потрібно на його кінцях підтримувати різницю потенціалів, тобто підтримувати електричне поле у провіднику. Для підтвердження цього висновку неонову лампочку приєднують до полюсів високовольтного випрямляча або до кондукторів електрофорної машини. При обертанні ручки машини неонova лампочка світиться неперервно, що доводить існування електричного поля і постійного електричного струму, який виникає під його дією.

З попередньої теми учні знають, що у випадку нерухомих зарядів поверхня провідника екіпотенціальна, а електричне поле всередині провідника відсутнє. У випадку постійного струму між кінцями провідника існує різниця потенціалів, а у провіднику існує електричне поле, відмінне від електростатичного. Його називають стаціонарним полем.

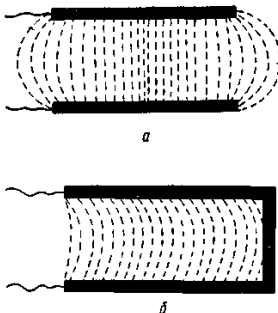
Відмінність стаціонарного поля від електростатичного можна продемонструвати так. Між двома ізолюючими штативами натягують дві товсті нитки, трохи зволожені мокрими пальцями. Одні кінці ниток приєднують до полюсів високовольтного випрямляча. Потенціали ниток вимірюються за допомогою електрометра (мал. 31). Для цього корпус електрометра заземлюють, а до стержня приєднують гнучкий провідник, до другого кінця якого приєднують пробну кульку на ізолюваній ручці. Спочатку показують, що при відсутності струму (кінці ниток не з'єднані) заряджені нитки мають однаковий потенціал по всій довжині. Для цього пробною кулькою дотикаються до однієї нитки в різ-

них її точках і переконуються, що покази електрометра однакові. Потім кінці ниток з'єднують і знову вимірюють потенціали вздовж всієї лінії. Тепер потенціали у різних точках нитки неоднакові, тобто поверхня провідника, в якому існує електричний струм, уже не є екіпотенціальною. Спад потенціалу вздовж провідника з струмом означає, що існує складова напруженості електричного поля, яка напрямлена вздовж провідника; лінії напруженості уже не перпендикулярні до поверхні провідника, а мають деякий нахил у напрямку струму. Це можна підтвердити за допомогою досліду.



Мал. 31

У плоску прозору кювету наливають трансформаторне мастило або рицинову олію і насипають трохи манної крупи, кристаликів гіпосульфиту або дрібно порізаного волосся. У кювету занурюють дві дерев'яні палички, що слугують електродами, і приєднують їх до високовольтного випрямляча або електрофорної машини. У проекції на екран спостерігають картину електростатичного поля (мал. 32 а). Потім дерев'яні електроди сполучають третьою паличкою і спостерігають стаціонарне поле (мал. 32 б).



Мал. 32

Його лінії напруженості не перпендикулярні до поверхні електродів. Це означає, що при наявності струму існує напруга між окремими точками провідника, внаслідок чого напруженість поля має повздовжню складову, яка створює напрямлений рух зарядів у провіднику.

Зауважимо, що стаціонарним полем називають електромагнітне поле постійного струму, яке має як електричну, так і магнітну складові. Ці складові не зв'язані між собою і можуть вивчатися окремо.

Стаціонарне поле як і електростатичне є потенціальним.

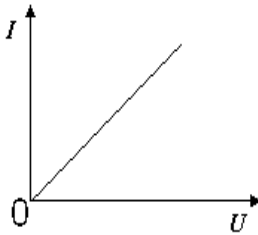
### **Б. Закон Ома для однорідної ділянки кола. Послідовне і паралельне з'єднання провідників.**

Ці питання досить повно вивчалися в базовому курсі фізики, тому їх треба згадати і повторити, до того ж учні будуть виконувати дві фронтальні лабораторні роботи: “Визначення питомого опору провідника” та “Послідовне і паралельне з'єднання провідників”.

Залежність сили струму в провіднику від прикладеної до нього напруги експериментально визначив німецький учений Георг Ом. Для однорідної ділянки кола сила струму прямо пропорційна прикладеній напрузі  $U$  і обернено пропорційна опору провідника  $R$ :

$$I = \frac{U}{R}.$$

Цю залежність називають законом Ома для ділянки кола. Залежність сили струму від напруги також називають вольт-амперною характеристикою провідника. Для металевих провідників вона найпростіша (мал. 33).



Мал. 33

Добуток  $I \cdot R = U$  називають спадом напруги. Опір є основною електричною характеристикою провідника. Його можна обчислити за допомогою закону Ома:  $R = \frac{U}{I}$ .

Провідник має опір 1 Ом, якщо при нарузі 1 В сила струму в колі 1 А.

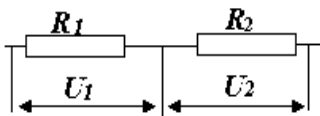
Опір провідника залежить від матеріалу і його геометричних розмірів. Він обчислюється за формулою:

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

де  $\rho$  – питомий опір матеріалу. Він чисельно дорівнює опору провідника, який має форму куба з ребром 1 м, якщо струм напрямлений уздовж нормалі до двох протилежних граней куба. Одиницею питомого опору є Ом·м.

Для практичних розрахунків зручно користуватися одиницею  $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ .

**Послідовне з'єднання провідників.** При послідовному з'єднанні електричне коло не має розгалуджень (мал. 34) Сила струму в обох провідниках однакова:  $I_1 = I_2 = I$ .



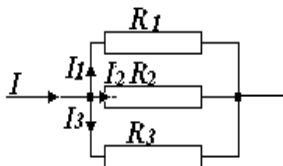
Мал. 34

Напруга на кінцях ділянки кола дорівнює сумі напруг на першому і другому провідниках:  $U_1 + U_2 = U$ . Загальний опір послідовного з'єднання провідників визначається за формулою:  $R_1 + R_2 = R$ .

Напруги на провідниках пропорціональні їх опорам:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

**Паралельне з'єднання провідників.** Таке з'єднання трьох провідників показано на малюнку 35.



Мал. 35

Ознакою паралельного сполучення провідників є розгалуження електричного струму. Напруга на паралельно з'єднаних провідниках однакова. Сила струму  $I$  у з'єднанні дорівнює сумі сил струмів у провідниках:

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Опір паралельного з'єднання обчислюється за формулою:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}.$$



Сили струму у провідниках обернено пропорціональні їх опорам:  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$ .

Застосування паралельного і послідовно з'єднання провідників можна показати на конкретних прикладах розрахунку шунтів до амперметра і додаткових опорів до вольтметра.

### В. Робота і потужність струму

При напрямленому русі вільних зарядів у провіднику сили електричного поля виконують роботу, яку називають роботою струму. Напруга на кінцях провідника визначається роботою, що виконується при перенесенні одиниці заряду  $U = \frac{A}{\Delta q}$ . З цього

виразу одержимо, що робота струму обчислюється за формулою  $A = \Delta q \cdot U$ . Врахувавши, що  $\Delta q = I \Delta t$  одержимо:  $A = I \cdot U \cdot \Delta t$ . Потужність струму обчислюється за формулою:  $P = IU$ .

Роботу струму можна обчислити за відомою потужністю:  $A = P \Delta t$ .

На практиці користуються такою одиницею роботи як кіловат-година. Потрібно встановити її зв'язок з джоулем:

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 1000 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ с} = 3600000 \text{ Вт} \cdot \text{с} = 3600000 \text{ Дж}.$$

При проходженні струму провідник нагрівається і віддає в навколишнє середовище певну кількість теплоти. Закон, що визначає цю кількість теплоти, називають законом Джоуля-Ленца. Він формулюється так: *кількість теплоти, яку виділяє провідник зі струмом, дорівнює добутку квадрата сили струму, опору провідника і часу проходження струму:*

$$Q = I^2 R \Delta t.$$

Використовуючи закон Ома для ділянки кола виразу для роботи струму можна надати різних виглядів:

$$A = IU \Delta t = I^2 R \Delta t = \frac{U^2}{R} \Delta t = Q.$$

З'ясуємо, за яких умов так можна поступити. Якщо струм проходить металевим нерухомим провідником, то вся робота

струму іде на нагрівання провідника, закон Ома для ділянки кола має вигляд  $I = \frac{U}{R}$  і вище наведені форми еквівалентні. Але

електрична енергія може перетворюватися не тільки у внутрішню, а й в механічну (в електродвигунах) і енергію хімічних зв'язків (при проходженні струму через розчини електролітів). У цих випадках закон Ома в звичайному вигляді не застосовний, бо треба враховувати ЕРС індукції (в електродвигунах) та ЕРС поляризації в електролітах, а, отже, формули, про які йшлося вище, не еквівалентні. Перший вираз  $A = IU\Delta t$  враховує всі перетворення електроенергії в інші види енергії, другий вираз  $Q = I^2 R \Delta t$  враховує лише перетворення електричної енергії у внутрішню, тобто визначає кількість виділеної теплоти, а третій вираз  $A = \frac{U^2}{R} \Delta t$  взагалі не визначений.

### Г. Електрорушійна сила. Закон Ома для повного кола

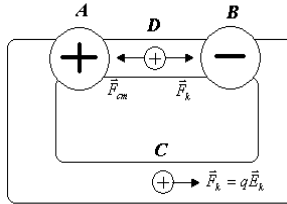
При з'ясуванні умов, необхідних для існування струму, звичай, не аналізуються перетворення енергії, які при цьому мають місце, хоча це питання має важливе значення.

Як відомо, електричне поле не може постійно приводити вільні заряди в рух, виконуючи при цьому роботу без поповнення енергії. Адже при проходженні струму в провіднику виділяється певна кількість теплоти. Різниця потенціалів на будь-якій ділянці кола при постійному струмі залишається незмінною, отже, і напруженість електричного поля в провіднику і його енергія залишаються сталими. Ця енергія постачається у коло електромагнітним полем.

Щоб струм у провіднику був тривалим, провідник має бути замкненим, інакше електричні заряди накопичувалися б на кінцях провідника і струм припинився б.

Для з'ясування цього питання розглядають два заряджені провідники  $A$  і  $B$  (мал. 36). Провідник  $A$  має вищий потенціал, ніж провідник  $B$ . Якщо з'єднати ці провідники третім провідником  $ACB$ , то позитивні заряди будуть рухатись під дією кулонів-

ських сил від провідника  $A$  до провідника  $B$ . Але такий рух швидко припиняється, бо потенціали провідників  $A$  і  $B$  вирівнюються.



Мал. 36

Щоб рух не припинявся, потрібно якимось чином перенести позитивні заряди від провідника  $B$  до провідника  $A$ , наприклад, за допомогою провідника  $BDA$ . Але на позитивні заряди у провіднику  $BDA$  будуть діяти кулонівські сили у напрямі від  $A$  до  $B$ . Отже, щоб позитивні заряди переміщалися від  $B$  до  $A$ , потрібно щоб на ділянці  $BDA$  діяли якісь сили, спрямовані проти кулонівських сил і більші за них за модулем. Сили, що діють на позитивні заряди у напрямі від  $B$  до  $A$ , мають бути не кулонівські (не електростатичні), їх називають сторонніми силами. Пристрої, у яких виникають сторонні сили, називають джерелами струму. З енергетичної точки зору в джерелі струму виконується робота сторонніми силами, тобто відбувається перетворення різноманітних видів енергії в енергію електричного поля. Так, наприклад, у хімічних джерелах струму за рахунок хімічних реакцій в електричну енергію перетворюється внутрішня енергія речовин, що реагують між собою, в індукційних генераторах в електричну енергію перетворюється механічна енергія двигунів тощо.

Після з'ясування цих питань вводиться основна фізична величина, що характеризує роботу сторонніх сил – електрорушійна сила (ЕРС).

*Електрорушійною силою називають фізичну величину, що характеризує електричне коло і дорівнює роботі сторонніх сил у джерелі при переміщенні одиничного позитивного заряду у замкнутому колі:*

$$\xi = \frac{A_{\text{стор}}}{q}.$$

Електрорушійна сила є характеристикою джерела і не залежить від того, з чого складається зовнішня частина кола. При розімкненому колі розподіл зарядів у джерелі відбувається доти, поки дія на заряд сил електричного поля не зрівноважиться дією сторонніх сил. Тоді різниця потенціалів між полюсами джерела досягає найбільшого значення. Отже, можна говорити, що різниця потенціалів на полюсах джерела струму при розімкнутому колі дорівнює ЕРС цього джерела.

Вираз закону Ома для повного кола можна одержати з енергетичних міркувань. При замиканні кола позитивно заряджені частинки у зовнішній частині кола під дією електричного поля рухаються від позитивного полюса до негативного. Оскільки зовнішня частина кола має опір, то в ній виділяється певна кількість теплоти. Всередині джерела струму діють сторонні сили і позитивні заряди рухаються від негативного полюса до позитивного. Внутрішня частина кола також має опір і в ній теж виділяється певна кількість теплоти. Якщо в колі немає ніяких інших змін крім нагрівання, то робота, виконувана сторонніми силами у джерелі, дорівнює кількості теплоти, що виділяється у всьому колі  $A = Q$ . Оскільки  $A = q\xi = \xi It$ , а  $Q = I^2(R+r)t$ , то  $\xi It = I^2(R+r)t$ . Звідси  $\xi = IR + Ir$ .

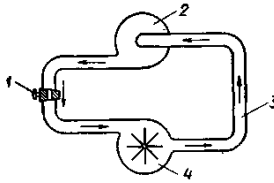
Добуток  $IR$  називають спадом напруги на зовнішньому опорі,  $Ir$  – спадом напруги на внутрішньому опорі джерела струму. Останню рівність записують у вигляді:

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

Це і є закон Ома для повного кола.

Продемонструвати ЕРС, внутрішній опір джерела струму та закон Ома для повного кола можна за допомогою електролітичної ванни. Ці досліди детально описані у посібнику [26].

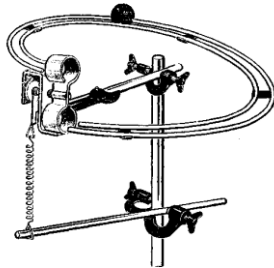
Електричне коло у певному розумінні аналогічне замкненій гідродинамічній системі, у якій циркулює вода (мал. 37).



Мал. 37

Насос 2 є аналогом джерела струму, вертушка 4 – споживача енергії, труби 3 – з’єднувальних провідників, кран 1 – вимикача. Трубами вода тече завдяки різниці тисків, у насосі вона рухається від точки, де тиск менший, до точки, де тиск більший. Отже, рух води в середині насоса зумовлений не різницею тисків, а силами пружності, що діють з боку лопатей насоса, які деформуються при прокачуванні води.

З’ясуванню фізичної суті явищ, що відбуваються в електричному полі, допомагає і механічна модель електричного кола (мал. 38), детально описана у посібнику [24, с. 45]. Зміст закону Ома для повного кола потрібно проаналізувати. Сила струму в колі залежить від трьох величин: ЕРС і внутрішнього опору, які характеризують джерело струму, та зовнішнього опору.

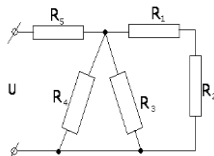


Мал. 38

## 5. Типові задачі

Задачі з даної теми можна умовно поділити на такі групи:

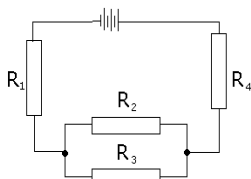
► **На обчислення величин, які характеризують електричне коло**



Мал. 39

– У колі (мал. 39)  $R_1=10$  Ом,  $R_2=15$  Ом,  $R_3=25$  Ом,  $R_4=50$  Ом,  $R_5=5$  Ом і сила струму  $I_1=2$  А. Визначити силу струму в колі і його розгалуженнях, а також загальну напругу.

– Знайти значення сили струму і напруги на ділянках зовнішнього кола (мал. 40), якщо кожний із трьох елементів має ЕРС  $\mathcal{E}_1=1,5$  В і внутрішній опір  $r_1=0,5$  Ом. У зовнішньому колі ввімкнені резистори з опорамі  $R_1=0,73$  Ом,  $R_2=4$  Ом,  $R_3=0,8$  Ом і  $R_4=1,58$  Ом.



Мал. 40

► **На обчислення роботи та потужності струму**

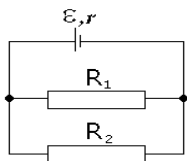
ЕРС джерела струму 2 В, внутрішній опір 1 Ом. Визначити силу струму, якщо зовнішнє коло споживає потужність 0,75 Вт. Пояснити зміст двох відповідей.

## 6. Організація контролю та обліку знань учнів

Оскільки на вивчення теми відводиться незначна кількість годин, давати контрольну роботу на весь урок не варто. Основне питання, по якому проводиться перевірка знань учнів, це закон Ома для повного кола. У контрольну роботу потрібно включати завдання на супутній матеріал, а саме: закон Ома для ділянки кола; послідовне і паралельне з'єднання провідників, залежність опору провідників від матеріалу та їх розмірів, робота і потужність струму.

►► **Наводимо приклад такого завдання**

Коло складається із джерела струму, ЕРС якого  $7,5\text{ В}$  і внутрішній опір  $0,3\text{ Ом}$ , та двох паралельно з'єднаних провідників з опорами відповідно  $3\text{ Ом}$  і  $2\text{ Ом}$  (мал. 41). Визначити силу струму в другому провіднику.



Мал. 41

Для оперативного контролю знань та закріплення матеріалу варто використати також тести з вибором відповіді. Робота з тестами не вимагає великих затрат часу і часто дає кращі результати, ніж завдання на одержання однієї відповіді, адже вибір правильної відповіді з декількох правдоподібних стимулює учнів до більш глибокого аналізу фізичних ситуацій.

Значну користь учням в опануванні матеріалом може принести робота зі структурною схемою матеріалу теми, яка наведена на початку лекції. Учням пропонують у клітинки схеми (вона має бути більших розмірів) вписати означення, поняття, закони, формули.



### Питання для самоконтролю

1. Які фронтальні роботи мають виконати учні під час вивчення теми?
2. Проведення яких демонстрацій вимагає програма при вивченні теми?
3. Які умови необхідні для існування постійного струму? Як це довести учням?
4. Проведіть науково-методичний аналіз поняття “електрорушійна сила”.
5. Порівняйте властивості стаціонарного електричного поля з властивостями електростатичного.
6. За яких умов робота струму дорівнює кількості теплоти, що виділяється у провіднику?
7. За яких умов формули  $IU\Delta t$ ,  $I^2R\Delta t$  і  $\frac{U^2}{R}\Delta t$  дають однаковий результат?
8. Як вивести закон Ома для повного кола, виходячи із закону збереження енергії?



---

**Лекція 10.**  
**Методика вивчення теми**  
**“МАГНІТНЕ ПОЛЕ”**

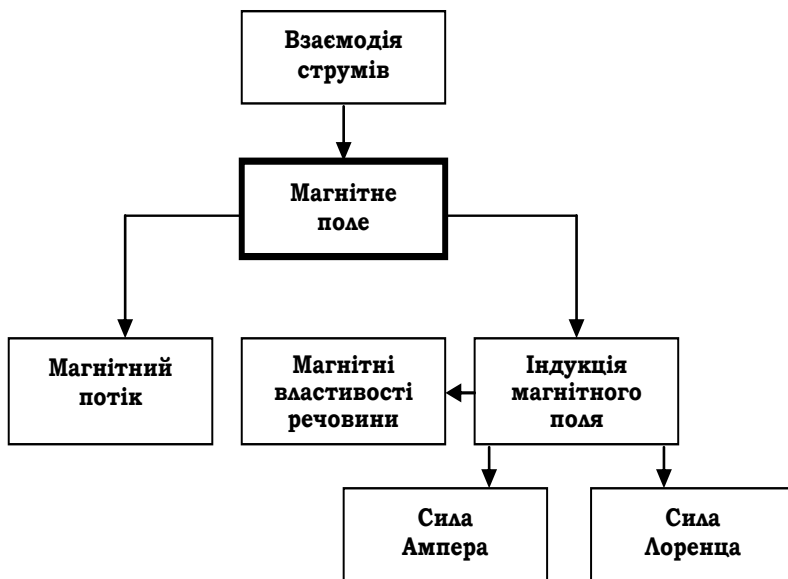
**1. Науково-методичний аналіз змісту  
та структури теми**

За своїм змістом і структурою тема займає проміжне положення в процесі формування фундаментального поняття електромагнітного поля. Вивчаючи матеріал теми, учні розширюють свої уявлення про фізичні поля, доповнюючи знання про електричне та гравітаційне поля новими знаннями про магнітне поле як окремий прояв поля електромагнітного. Початкові відомості про магнітне поле учні отримують при вивченні базового курсу фізики. У старшій школі ці знання розширюються, доповнюються кількісними характеристиками, законами і закономірностями, властивими для магнітного поля.

Зміст програмного матеріалу теми можна представити трьома групами питань:

1. Взаємодія струмів. Магнітна індукція. Магнітний потік.
2. Сила Ампера. Принцип дії вимірювальних приладів. Гучномовець. Сила Лоренца.
3. Магнітні властивості речовини. Феромагнетики. (Магнітна проникність. Магнітний запис інформації).

Системний зв'язок між цими групами показано на структурно-логічній схемі.



Тема побудована на основі принципу близькодії. Це дозволяє досягти розуміння учнями того, що магнітне поле – це особливий вид матерії, через який здійснюється магнітна взаємодія.

Для кількісного опису магнітного поля в фізиці використовуються дві основні векторні характеристики – вектор напруженості магнітного поля  $\vec{H}$ , та вектор індукції магнітного поля  $\vec{B}$ . Оскільки магнітне поле часто порівнюють з полем електричним, при введенні обох характеристик може виникнути термінологічна проблема розуміння фізичного змісту кожної з них, адже вектор магнітної індукції –  $\vec{B}$  є аналогом вектора напруженості електричного поля –  $\vec{E}$ , а вектор напруженості магнітного поля  $\vec{H}$ , аналогом вектора електростатичної індукції  $\vec{D}$ , тому в шкільному курсі фізики вивчаються лише силові характеристики електричного та магнітного полів – відповідно  $\vec{E}$  та  $\vec{B}$ .

У структурі теми практично реалізований такий підхід, коли перш за все розглядається магнітне поле *струму*. За такого підходу учнів знайомлять з фундаментальними дослідженнями Роуланда та Ерстеда, які довели зв’язок магнітного поля з рухомими зарядами. Досвід показує, що такий підхід є раціональним, оскільки звернення до знань про магнітне поле постійних магнітів полегшує сприйняття дослідів, аналіз фізичних явищ, розв’язування задач. Значно полегшує усвідомлення властивостей магнітного поля вивчення його дії на провідник зі струмом – сили Ампера, та на рухомі заряджені частинки – сили Лоренца.

Важливим етапом формування уявлень про магнітне поле як виду матерії є вивчення його взаємодії з речовиною та введення поняття магнітної проникності речовини.

Тема має велике практичне значення, оскільки не лише сприяє розширенню наукового світогляду учнів, а й знайомить їх із техніко-технологічними прикладаннями фізичних знань як на виробництві, так і в побуті.

## **2. Основні поняття та їх науково-методичний аналіз**

Центральним поняттям теми є магнітне поле. Іншими важливими поняттями є вектор магнітної індукції, магнітний потік, магнітна проникність речовини, діамагнетизм, парамагнетизм та феромагнетизм.

Під *магнітним полем* розуміють окремий прояв електромагнітного поля в системі відліку, у якій заряджені частинки рухаються рівномірно. Перебуваючи в органічному зв’язку з рухомими зарядженими частинками, магнітне поле діє на інші рухомі заряджені частинки.

*Магнітна індукція* є векторна фізичною величиною, яка характеризує магнітне поле і описує його силову дію на рухомі частинки. Модуль вектора магнітної індукції визначається як відношення сили, що діє на провідник зі струмом, до значення елемента цього струму. Існують інші способи означення модуля магнітної індукції, але вони всі ідентичні.

**Магнітний потік** – це фізична величина, яка описує магнітне поле в просторі і дорівнює добутку магнітної індукції поля на площу поверхні, яка знаходиться в цьому полі.

**Магнітна проникність** є фізичною величиною, яка характеризує взаємодію речовини і магнітного поля і чисельно дорівнює відношенню магнітної індукції в речовині до магнітної індукції поза речовиною.

Під **діамагнетизмом** розуміють явище послаблення магнітної індукції поля внаслідок взаємодії магнітного поля з речовиною, яка в цьому випадку називається **діамагнетиком**.

Під парамагнетизмом розуміють явище незначного підсилення магнітної індукції в речовині внаслідок взаємодії магнітного поля і речовини, яка в цьому випадку називається **парамагнетиком**.

**Феромагнетизмом** називають явище аномально високого (до 100000 разів) підсилення магнітної індукції в речовинах з доменною структурою. Ці речовини називаються **феромагнетиками**.

### **3. Навчальний фізичний експеримент**

#### **Демонстраційний експеримент**

Взаємодія паралельних струмів [9, с. 301; 35, с. 167; 24, с. 120]. Дія магнітного поля на струм [9, с. 304; 24, с. 128]. Розмагнічування за допомогою нагрівання [9, с. 330; 24, с. 144]. Модель доменної структури феромагнетиків [9, с. 332; 24, с. 141]. Будова і дія амперметра і вольтметра. Відхилення електронного пучка магнітним полем [35, с. 183; 24, с. 93]. Будова і дія гучномовця. Магнітний запис звуку [35, с. 184].

#### **Лабораторна робота**

“Спостереження дії магнітного поля на струм”.

#### 4. Методика вивчення основних питань теми

Починають вивчати магнітне поле з доказу зв'язку магнітного поля з рухомими електричними зарядами. З цією метою демонструють взаємодію паралельних струмів, дослід Ерстеда, взаємодію електричного струму в провіднику з рухомими електронами в електронно-променевої трубці. На основі аналізу цих дослідів та актуалізації знань, отриманих в основній школі, формулюється висновок про існування магнітного поля, яке завжди пов'язане з рухомими електрично зарядженими частинками і діє на рухомі електрично заряджені частинки. Суттєвим підтвердженням зв'язку магнітного поля з рухомими частинками може бути опис досліду Роуланда.

Для характеристики інтенсивності магнітної взаємодії вводять поняття магнітної індукції. Оскільки магнітна індукція характеризує силову дію магнітного поля, вона є векторною фізичною величиною і позначається буквою  $\vec{B}$ .

На відміну від напруженості електричного поля магнітна індукція, будучи також величиною векторною, не збігається з напрямом сили, яка діє на провідник зі струмом.

Напрямок вектора магнітної індукції визначають за допомогою магнітної стрілки, яка показує його напрям своїм північним полюсом. Для прямого провідника зі струмом та замкнутого провідника формулюється правило правого гвинта.

Поняття про модуль вектора магнітної індукції вводять на основі аналізу силової дії магнітного поля на виток зі струмом. Показують, що максимальний обертальний момент, який діє на виток у магнітному полі, пропорційний силі струму у витку та його площі. Відношення пропорційних величин є сталою величиною. Тому

$$\frac{M_{\max}}{I \times S} = B.$$

Одиницею магнітної індукції є тесла.

$$1 \text{ Tл} = 1 \frac{\text{H}}{\text{A} \times \text{м}}.$$

Для дослідження структури магнітного поля використовують метод спектрів. Слід продемонструвати магнітні спектри

прямого провідника, витка зі струмом, а також соленоїда [24, досл. 84]. Спектри можна зобразити на папері у вигляді ліній магнітної індукції, тобто, ліній, дотичні до яких у кожній точці показують напрям магнітної індукції.

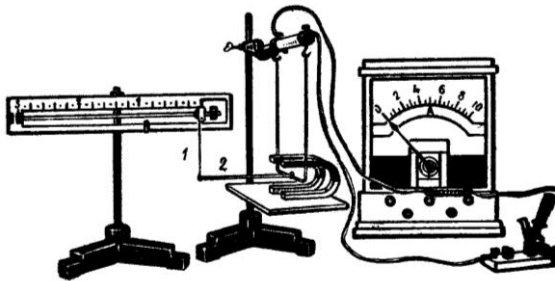
Густина ліній магнітної індукції пропорційна модулю магнітної індукції, а напрям визначається за правилом правого гвинта.

Оскільки лінії індукції завжди замкнуті, приходять до висновку, що відсутні магнітні заряди, а тому магнітне поле вихрове і не має потенціалу.

З лініями магнітної індукції пов'язане поняття магнітного потоку. Магнітний потік – фізична величина, яка кількісно пропорційна числу ліній, що проходять через площу замкнутого контура. Проте введення цього поняття в даній темі, як передбачають програми з фізики, не має достатньо підстав, оскільки це поняття в даній темі не “працює”. Одним з варіантів переборення вказаної суперечності є перенесення цього поняття в тему “Електромагнітна індукція”, де без нього неможливо науково достовірно викласти навчальний матеріал.

Велике практичне і пізнавальне значення має вивчення сили Ампера і сили Лоренца.

Силу Ампера зручно вводити на основі експерименту. П-подібну дротину на м'якому підвісі закріплюють на штативі таким чином, щоб горизонтальна частина її перебувала у магнітному полі підковоподібного магніта (мал. 42).



Мал. 42

Якщо в провіднику протікає електричний струм, вона починає рухатися між полюсами магніта. Для вимірювання сили, що діє у магнітному полі на провідник зі струмом, використовують чутливий динамометр. Демонструють учням, що сила Ампера залежить від сили струму в провіднику, індукції магнітного поля, довжини елемента струму, який знаходиться між полюсами а, також, від кута між магнітною індукцією і провідником [24, досл. 85]. На основі експерименту записують формулу  $F = BIl \sin \alpha$ .

Напрямок сили Ампера визначається за правилом лівої руки: *якщо ліву руку розмістити так, щоб лінії магнітної індукції входили в долоню, а чотири пальці показували напрям струму, то відставлений великий палець покаже напрям сили, яка діє на провідник зі струмом у магнітному полі.*

Використання сили Ампера в техніці можна проілюструвати, розглянувши принцип дії електровимірювальних приладів магнітоелектричної системи та електричних двигунів постійного струму. Пропонований програмою приклад динамічного гучномовця не можна вважати вдалим, оскільки його робота пов’язана з використанням змінного струму, який вивчається дещо пізніше.

Сила Лоренца вводиться як сила, що діє на рухому заряджену частинку з боку електричного і магнітного полів одночасно, тобто  $\vec{F}_n = \vec{F}_e + \vec{F}_m$ .

Далі розглядають випадок, коли електрична складова відсутня і рухома заряджена частинка перебуває під впливом лише магнітного поля. Для розрахунку магнітної складової сили Лоренца використовують знання про силу Ампера.

Сила Ампера є результатом дії магнітного поля на всі заряджені частинки в провіднику. Її можна розрахувати, використавши відомий з електронної теорії вираз для сили струму

$$I = qn v S,$$

де  $I$  – сила струму;

$q$  – заряд частинки;

$n$  – концентрація частинок у провіднику;

$v$  – швидкість напрямленого руху частинок;

$S$  – площа поперечного перерізу провідника.

Тоді силу Ампера можна записати у вигляді формули

$$F_A = Bq \frac{N}{V} v S \Delta l \sin \alpha ,$$

або оскільки  $S \Delta l = V$ , то  $F_A = BqvN \sin \alpha$ .

Якщо сила Ампера є рівнодійною сил, які діють на  $N$  рухомих заряджених частинок, то на одну частинку буде діяти сила в  $N$  разів менша. Тобто  $F_n = \frac{F_A}{N} = qvB \sin \alpha$ .

Напрямок сили Лоренца, як і сили Ампера, визначається за правилом лівої руки, яке справедливе для позитивно заряджених частинок і зазнає незначних змін для негативно заряджених: чотири пальці слід спрямовувати проти їх руху.

Сила Лоренца завжди напрямлена під кутом до швидкості зарядженої частинки, тому надає їй доцентрового прискорення.

Для випадку, коли  $\alpha = 90^\circ$ ,  $qvB = \frac{mv^2}{R}$ .

Тоді  $R = \frac{mv}{qB}$ .

Отже, заряджена частинка починає рухатись по дузі кола. При інших значеннях кута  $\alpha$  траєкторія руху зарядженої частинки в магнітному полі набуває форми спіралі.

Дію сили Лоренца можна продемонструвати, підносячи магніт до працюючої електронно-променевої трубки з вимкненою розгорткою. Зміщення світної плями на екрані свідчатиме про відхилення електронного пучка в магнітному полі.

Використання сили Лоренца в науці й техніці ілюструють шляхом розгляду загальних принципів дії відхиляючої системи телевізійного кінескопа, циклічних прискорювачів заряджених частинок, МГД-генераторів і ін.

Взаємодію речовини з магнітним полем починають вивчати з демонстрації різного впливу магнітного поля на різні речовини. Показують, що різні речовини по-різному взаємодіють з магнітним полем [24, досл. 95]. Згідно з результатами дослідів



вводять поняття діамагнетиків, парамагнетиків і феромагнетиків. Оскільки така класифікація пов’язана з інтенсивністю взаємодії речовини і магнітного поля, то виникає необхідність введення фізичної величини, яка характеризує магнітні властивості речовини. Цю величину називають магнітною проникністю. Чисельно вона дорівнює відношенню магнітної індукції поля в речовині до магнітної індукції поля поза речовиною:  $\mu = \frac{B}{B_0}$ .

Для діамагнетиків  $\mu < 1$ , для парамагнетиків  $\mu > 1$ , але ці значення дуже близькі до 1.

Однак існують речовини, які мають  $\mu \gg 1$ . Їх назвали феромагнетиками. Феромагнітні властивості з чистих речовин мають лише залізо, нікель, кобальт, гадоліній.

Високу магнітну проникність феромагнетиків пояснюють особливостями їх внутрішньої будови, а саме, наявністю доменів – областей із впорядкованим розташуванням атомів і, відповідно, їх магнітних моментів.

Магнітні поля доменів у ненамагніченому феромагнетикі розташовані хаотично і компенсують одне одного. Потрапляючи у зовнішнє магнітне поле домени перебудовуються таким чином, що їх магнітне поле підсилює зовнішнє.

Оскільки внутрішня кристалічна структура феромагнетика залежить від температури, зі зміною температури змінюються і їх магнітні властивості. За певної температури, як правило достатньо високої, феромагнітні властивості зникають. Значення температури, за якої зникають феромагнітні властивості речовини, називають точкою Кюрі.

На закінчення вивчення теми повідомляють учням, що глибоке дослідження властивостей речовини дозволило створити нові феромагнітні матеріали зі специфічними властивостями, зокрема, з аномально високою магнітною проникністю, великим гістерезисом тощо.

Усі ці властивості феромагнетиків використовуються в техніці. Так, явище підсилення магнітного поля феромагнетиками широко використовується в електричних трансформаторах, еле-

ктромагнітах, реле тощо. Явище залишкової намагніченості використовується для запису інформації в магнітофонах та в комп'ютерних накопичувачах – вінчестерах.

## 5. Типові задачі

### ►► На визначення модуля та напрямку вектора магнітної індукції

– Визначити значення магнітної індукції поля, в якому на рамку зі струмом  $5\text{ А}$  діє момент сили  $0,02\text{ Н}\cdot\text{м}$ . Довжина рамки  $10\text{ см}$ , ширина  $20\text{ см}$ .

– Показати, яким буде напрям вектора магнітної індукції в центрі дрютяного витка зі струмом будь-якої форми.

### ►► На розрахунок сили Ампера

– На провідник довжиною  $20\text{ см}$  зі струмом  $2\text{ А}$  однорідне магнітне поле діє з силою  $0,02\text{ Н}$ . Визначити кут між напрямком струму і вектором магнітної індукції.

– Пояснити, чому два паралельні провідники зі струмом одного напрямку притягуються, а різного – відштовхуються?

### ►► На розрахунок сили Лоренца

– Електрон, який рухався у вакуумі зі швидкістю  $100\frac{\text{км}}{\text{с}}$ , влітає у магнітне поле з індукцією  $0,2\text{ Тл}$  перпендикулярно до лінії магнітної індукції. Дайте відповідь:

а) якою траєкторією буде рухатись електрон?

б) який радіус цієї траєкторії?

в) який період обертання електрона?

У яких напрямках відхилитиметься електронний пучок чи потік позитивних йонів при піднесенні до нього магніта різними полюсами?

### ►► На взаємодію магнітного поля з речовиною.

– Чому платіжні магнітні картки не рекомендується зберігати поряд із мобільним телефоном?

– Яка технологія виготовлення постійних магнітів?

## 6. Організація контролю і обліку знань учнів

Для підвищення ефективності поточного контролю знань учнів після вивчення сили Ампера доцільно провести короткочасну самостійну роботу.

Підсумковий контроль знань учнів з теми доцільно організувати у формі письмової контрольної роботи, до якої слід увести як розрахункові, так і якісні задачі, наприклад, на визначення напрямку та значення сили Ампера чи сили Лоренца.



### Запитання для самоконтролю

1. Який зміст теми „Магнітне поле” в шкільній програмі?
2. Які основні поняття теми та яка послідовність їх уведення?
3. Яка методика введення поняття магнітної індукції?
4. Які особливості вивчення сили Ампера та сили Лоренца?
5. Які типові задачі з теми?

---

## Лекція 11.

### Методика вивчення теми “ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ”

#### 1. Науково-методичний аналіз змісту та структури теми

*Зміст теми складається з п'яти блоків*

1. Електричний струм у металах. Основні положення електронної теорії провідності металів. (Залежність опору від температури. Надпровідність).
2. Електричний струм у вакуумі. Електронна емісія. (Двоелектродна лампа). Електронно-променева трубка. (Принцип дії осцилографа).
3. Електричний струм в електролітах. Закони електролізу. Застосування електролізу.
4. Електричний струм у газах. Несамостійний і самостійний розряди в газах. Поняття про плазму.
5. Електричний струм у напівпровідниках. Електропровідність напівпровідників. Терморезистор. Власна і домішкова провідності напівпровідників. Електронно-дірковий перехід.

Напівпровідниковий діод. (Транзистор). Застосування напівпровідникових приладів.

Відображена в програмі послідовність вивчення провідності різних середовищ установа з огляду на те, що учні вже мають певні залишкові знання про електропровідність металів з попередніх років навчання. На основі цих знань і додаткових відомостей можна без особливих труднощів з'ясувати основні положення електронної теорії провідності, на основі яких розглядаються всі випадки проходження струму в інших середови-

шах. Таким чином реалізується єдиний підхід до вивчення струму в різних середовищах.

Тема має велике світоглядне, політехнічне та профорієнтаційне значення, оскільки її вивчення супроводжується з'ясуванням застосування особливостей струму в різних середовищах, та їх роль у розвитку сучасних виробництв та промисловості.

## **2. Основні поняття теми та їх науково-методичний аналіз**

Кожен із п'яти блоків програми має певний набір нових для учнів понять, формуванню яких слід приділити достатню увагу, а саме:

**Фізичний вакуум**, електроліз, газовий розряд, напівпровідник, дірка, *p-n* перехід.

**Фізичний вакуум** – середовище, в якому довжина вільного пробігу вільних частинок більша за розміри обмеженої області. Існує також віртуальне поняття абсолютного вакууму – простору, в якому відсутні речовина чи фізичні поля.

**Електроліз** – процес виділення речовини на електродах внаслідок проходження електричного струму та протікання окислювально-відновлювальних реакцій. Як правило, це поняття стосується процесу проходження струму в розчинах і розплавах електролітів.

**Газовий розряд** – процес проходження електричного струму в газах.

**Напівпровідник** – кристалічна речовина, яка має додатній температурний коефіцієнт провідності. За значенням питомого опору, зазвичай, займає проміжне положення між діелектриками і провідниками.

**Дірка** – вакантне місце електрона в розірваному ковалентному зв'язку. Ідентифікується з реальною частинкою, яка має позитивний заряд.

***P-n* перехід** – область, у якій змінюється тип провідності напівпровідника.

### 3. Навчальний фізичний експеримент

#### Демонстрації

Термоелектронна емісія [9, с. 256; 24, с. 87]. Залежність опору металів від температури [9, с. 219; 35, с. 175; 24, с. 52]. Однобічна електронна провідність вакуумного діода [9, с. 256; 24, с. 89]. Будова і дія електронно-променевої трубки [9, с. 261; 24, с. 92]. Порівняння електропровідності води і розчину солі або кислоти [24, с. 62]. Електроліз розчину сульфату міді [9, с. 234; 24, с. 62]. Несамостійний розряд [9, с. 240; 35, с. 187; 24, с. 70]. Самостійний розряд у газах за зниженого тиску [9, с. 248; 24, с. 73]. Залежність опору напівпровідників від температури [9, с. 269; 24, с. 104]. Дія терморезистора [9, с. 269; 24, с. 106]. Однобічна електрична провідність напівпровідникового діода [9, с. 283; 24, с. 114]. Залежність сили струму в напівпровідниковому діоді від напруги [9, с. 284; 24, с. 116]. Електронно-дірковий перехід транзистора [9, с. 294; 24, с. 116]. Підсилення постійного струму транзистором [9, с. 296; 35, с. 208; 24, с. 117].

Перелічені вище демонстрації можуть бути ефективно відтворені в умовах шкільного кабінету фізики за умови належної його комплектації промисловими або саморобними приладами.

Програмою передбачається виконання *фронтальної лабораторної роботи* “Вимірювання заряду електрона”, дидактична мета якої подвійна: ознайомлення учнів з явищем електролізу та одним із методів вимірювання заряду електрона.

### 4. Методика вивчення основних питань теми

Оскільки тема складається з підтем, кожна з них може розглядатись як цілком завершена структурна одиниця зі своїми основними поняттями.

*Електричний струм у металах.* Початок створення класичної електронної теорії провідності металів пов’язують з науковою діяльністю англійського фізика Д.Д. Томсона, який у 1897 році відкрив електрон, а в 1898 році визначив його заряд.

Німецький фізик П. Друде у 1900 році поклав основи класичної теорії провідності металів, яку розвинув у 1904 році Г. Лоренц.

Електронна провідність металів була доведена наступними фундаментальними дослідженнями:

1. Дослід Рікке, який показав, що електропровідність металевих провідників не пов’язана з перенесенням речовини.
2. Дослід Толмена і Стюарта (1916р.), який дозволив визначити знак та питомий заряд “носіїв заряду” в металевих провідниках.

У основу електронної теорії провідності металів покладені ідеї кінетичної теорії газів. Уважається, що вільні електрони в металах підлягають законам ідеального газу. Середня квадратична швидкість хаотичного руху електронів може бути визначена так:

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{3kT}{m}},$$

де  $k$  – стала Больцмана;

$T$  – температура;

$m$  – маса електрона;

$\bar{u}$  – середня квадратична швидкість.

Для кімнатної температури ця швидкість сягає 110 км/с.

Якщо на кінцях провідника створити різницю потенціалів, однорідне електричне поле всередині провідника буде діяти на кожен з електронів з певною силою. Під дією електричного поля на хаотичний рух електронів накладається їх напрямлене переміщення в бік дії сили, тобто у провіднику утворюється електричний струм. Швидкість упорядкованого руху електронів у металевому провіднику при силі струму в декілька ампер менша за 1 мм/с.

Електронна теорія провідності дає можливість одержати закон Ома у такому вигляді:

$$j = \frac{e^2 n \bar{\lambda}}{2m\bar{u}},$$

де  $e$  – заряд електрона;

$n$  – концентрація електронів;

$\bar{\lambda}$  – середня довжина вільного пробігу електронів;

$m$  – маса електрона;

$\bar{v}$  – середня квадратична швидкість хаотичного руху електронів;

$j$  – провідність.

Експериментальні дослідження показали, що даний вираз справджується лише за звичайних та високих температур, тобто, застосування класичної електронної теорії є обмеженим.

Електричний опір металевого провідника залежить від температури. Почати вивчення цього питання доцільно з експерименту: складають електричне коло, в якому електрична лампочка живиться від джерела струму з регульованою напругою. Напругу на лампочці та силу струму в ній вимірюють за допомогою демонстраційних вольтметра та амперметра. Вмикають коло і знімають покази вольтметра та амперметра, а потім пропонують учням розрахувати силу струму, яка буде в колі, якщо напругу підвищити вдвічі, у межах допустимого для даного типу лампочки. За законом Ома сила струму повинна теж зрости удвічі. Але дослідна перевірка показує, що сила струму в колі суттєво менша від розрахованої.

У ході аналізу створеної проблеми припускають, що можливою причиною спостережуваного результату є залежність опору металевого провідника від температури. Для підтвердження гіпотези проводять експеримент: у зібране електричне коло послідовно з лампочкою вмикають сталеву спіраль, вмикають струм і демонструють, що при нагріванні спіралі сила струму в колі знижується. Ретельні дослідження показали, що залежність опору металевого провідника від температури така:

$$R = R_0 (1 + \alpha \cdot t^\circ),$$

де  $R_0$  – опір провідника при  $0^\circ\text{C}$ ;

$R$  – опір провідника за температури  $t^\circ\text{C}$ ;

$\alpha$  – температурний коефіцієнт опору металу.



Причину зростання опору металевих провідників при підвищенні температури пояснюють на основі положень електронної теорії провідності з врахуванням внутрішньої будови металів. Оскільки при підвищенні температури зростає інтенсивність коливань йонів кристалічної ґратки, то швидкість напрямленого руху електронів зменшується. При цьому важливо підкреслити, що такі уявлення є досить наближеними, оскільки електронний газ і кристалічна ґратка становлять квантовану систему, а тому без залучення положень квантової теорії неможливо дати вичерпне пояснення природи електричного опору металів.

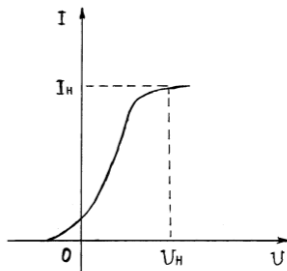
Велике пізнавальне значення має повідомлення учням про практичне застосування явища залежності опору металевих провідників від температури (термометри опору) та явища надпровідності, відкритого в 1911 році данським фізиком Каммерлінґ-Онессом. При цьому важливо розповісти, що в наш час ведуться інтенсивні пошуки “високотемпературних” надпровідних матеріалів, винайдення яких могло б стати стимулом для розвитку електроенергетики, електротранспорту, електроніки та інших галузей науки і техніки, які базуються на використанні енергії електричного струму.

**Електричний струм у вакуумі.** Основоположним поняттям теми є поняття вакууму. Оскільки в учнів стихійно склалися уявлення про вакуум як про простір, де повністю відсутня речовина, потрібно вказати, що практично досягти такого стану неможливо. Тому у фізиці використовується поняття фізичного вакууму як середовища, в якому довжина вільного пробігу молекул співрозмірна з розмірами посудини, де знаходиться газ.

Оскільки в такому середовищі вільні носії заряду практично відсутні, то для одержання електричного струму їх треба якимось чином ввести. З цією метою можна використати явище термоелектронної емісії, яке полягає у випромінюванні електронів розжареними тілами, або фотоелектронної емісії, під час якої електрони вивільнюються під дією світла.

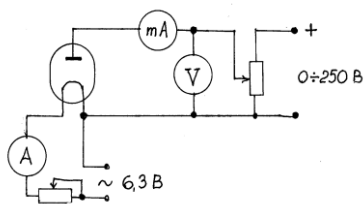
Детально особливості електричного струму у вакуумі розглядають під час з'ясування принципу дії електронної лампи – діода.

Основною властивістю діода є його однобічна провідність, а основною характеристикою – залежність сили струму від напруги між анодом і катодом, або його вольт-амперна характеристика (ВАХ), яка показана на мал. 43.



Мал. 43

Продемонструвати однобічну провідність і ВАХ можна, використавши демонстраційну лампу-діод та зібравши коло за схемою, показаною на мал. 44.



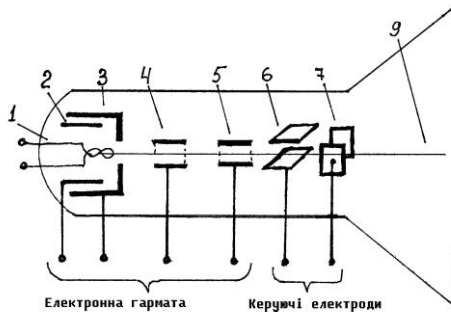
Мал. 44

Як джерело струму доцільно використати випрямляч ВУП-2 або подібний йому, для вимірювання напруги та сили струму краще застосувати відповідні демонстраційні гальванометри з додатковими опорами та шунтами.

Демонстрація проводиться в декілька етапів:

1. Однобічна провідність діода, яка стає помітною при зміні полярності анодного джерела струму.
2. Наявність струму насичення, коли збільшення анодної напруги не призводить до збільшення сили струму в анодному колі.
3. Залежність сили струму насичення від температури катода.

Оскільки застосування вакуумних ламп у сучасних електронних приладах досить обмежене, то як приклад технічного застосування струму у вакуумі доцільно розглянути будову і принцип дії електронно-променевої трубки (мал. 45). Вона є основною частиною багатьох моделей телевізорів, комп'ютерних моніторів, осцилографів та інших електронних приладів.

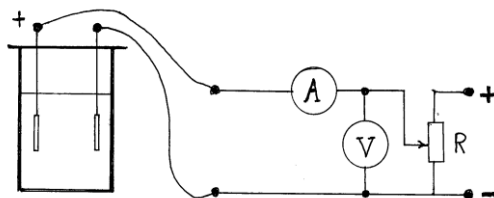


Мал. 45

Основними елементами електронно-променевої трубки є колба, в якій створено високий вакуум, електронна гармата, що утворює сфокусований і керований за інтенсивністю електронний промінь, система відхилення променя та люмінесцентний екран.

Будову та принцип дії електронно-променевої трубки доцільно розглянути на моделі цієї трубки, використавши також її схематичне зображення на таблиці.

**Електричний струм в рідинах.** Вивчення теми традиційно розпочинається з експерименту. Для цього беруть скляну посудину з двома вугільними електродами, наливають в неї дистильовану воду і під'єднують електроди до джерела струму (мал. 46).



Мал. 46

Для вимірювання напруги і сили струму в утвореному електричному колі використовують демонстраційні вольтметр і амперметр. Змінюючи напругу від 0 до 30 В, помічають, що стрілка амперметра залишається на нульовій поділці. Отже, дистильована вода не проводить електричний струм. Але варто в посудину з водою капнути декілька крапель сірчаної кислоти, яка за звичайних умов також є діелектриком, як стрілка амперметра відхиляється від нульової поділки, вказуючи на існування електричного струму в колі. Отже, при розчиненні кислоти у воді створюються умови для проходження електричного струму. При розчиненні у воді солей, лугів, кислот, які в хімії називають електролітами, відбувається розпад молекул на йони. Цей процес називається електролітичною дисоціацією. Незв'язані йони, які при цьому утворюються, під дією електричного поля між електродами утворюють електричний струм у колі.

Йонна провідність розчинів електролітів супроводжується переносом і виділенням на електродах речовин, що входять до складу електролітів. Такий процес виділення речовини на електродах внаслідок окислювально-відновлювальних реакцій називають електролізом.

Теоретичним підтвердженням справедливості такого тлумачення природи струму в розчинах електролітів є виведення закону Фарадея для електролізу на основі електронної теорії. Його можна подати учням у такому вигляді.

Маса речовини, що виділяється за інтервал часу  $\Delta t$  на електроді може бути обчислена так:

$$m = m_{0i} N_i,$$

де  $m_{0i}$  – маса йона,

$N_i$  – кількість йонів.

Маса одного йона може бути розрахована на основі положень молекулярної фізики:

$$m_{0i} = \frac{M}{N_A},$$

де  $M$  – молярна маса речовини;

$N_A$  – число Авогадро.

Кількість йонів, що досягли електрода, можна розрахувати, знаючи заряд йона і загальний заряд, який пройде в колі за певний час:

$$N_i = \frac{\Delta Q}{Q_{0i}},$$

де  $\Delta Q = I \Delta t$  – заряд, що пройшов через електроліт за інтервал часу  $\Delta t$ ;

$Q_{0i}$  – заряд даного йона.

Застосувавши положення про дискретність електричного заряду, одержимо:

$$Q_{0i} = n e,$$

де  $n$  – валентність атома;

$e$  – заряд електрона.

Остаточно маємо:

$$m = \frac{M}{Na} \frac{\Delta Q}{Q_{oi}} = \frac{M}{Na} \frac{I \Delta t}{n e}.$$

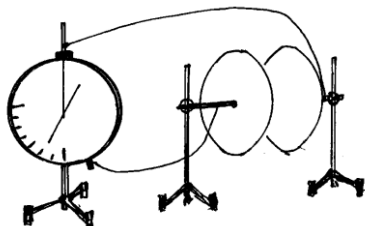
Оскільки числове значення виразу  $\frac{1}{eNa} \frac{M}{n} = k$  залежить лише від природи речовини, то його називають електролітичним еквівалентом цієї речовини.

Тоді остаточний вираз першого закону Фарадея для електролізу буде мати такий вигляд:  $m = kI \Delta t$ .

Вперше електроліз дослідив і в 1834 році сформулював його закони англійський вчений М. Фарадей.

Розглядаючи практичне значення електролізу, учням розповідають, що електроліз набув широкого застосування в промислових технологіях для нанесення декоративних покриттів на металеві вироби (гальваностегія), виготовлення металевих зліпків з рельєфних моделей (гальванопластика), одержання металів з розплавлених руд (наприклад, алюмінію), очистки металів (гідрометалургія), у добуванні хлору і т.д.

**Електричний струм у газах** теж доцільно почати з експерименту. Беруть електрометр з приєднаними до нього дисками і заряджають цей плоский конденсатор до певної різниці потенціалів (мал. 47).



Мал. 47

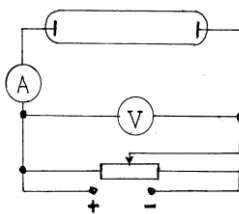
При кімнатній температурі, якщо повітря сухе, конденсатор помітно не розряджається. Це свідчить про те, що електричний струм у шарі повітря між дисками практично відсутній. Повітря можна вважати діелектриком. Якщо внести в простір

між пластинами запалений сірник чи свічку, то стрілка електрометра покаже зменшення заряду. Такого ж ефекту можна досягти, якщо повітряний простір між дисками опромінювати ультрафіолетовим, рентгенівським чи радіоактивним випромінюванням. Пояснення природи струму в цьому випадку потрібно здійснити на основі електронної теорії. Під дією нагрівання і різних видів випромінювання нейтральні атоми газів розпадаються на позитивні йони й електрони – відбувається процес йонізації газу.

Частина вільних електронів приєднується до нейтральних молекул і утворює негативні йони. За наявності електричного поля йони та електрони набувають певної швидкості уздовж силових ліній поля. Процес проходження струму в газі називають газовим розрядом.

Електричний розряд у газах досліджують за допомогою скляної трубки з двома електродами, увімкненої в електричне коло так, як показано на схемі (мал. 48).

Якщо діяти на газ в трубці якимось йонізатором, у трубці буде протікати електричний струм. Із збільшенням різниці потенціалів між електродами трубки кількість заряджених частинок, що досягають електродів, зростає, а, отже, зростає і сила струму в колі.



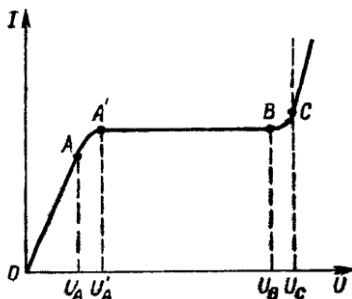
Мал. 48

При певному значенні напруги сила струму в колі перестає зростати – досягає насичення, що свідчить про те, що всі заряджені частинки, що утворились під дією йонізатора, досягають

електродів трубки. Силу струму насичення можна збільшити, посиливши дію йонізатора.

Якщо підвищувати напругу між електродами трубки й надалі, при певному значенні напруги сила струму в колі знову починає швидко зростати. І, навіть, якщо прибрати зовнішній йонізатор, струм у колі з трубкою не припиняється, оскільки відбувається йонізація електронним ударом. Розряд, що не потребує для свого підтримання зовнішнього йонізатора, називається самостійним газовим розрядом.

Усі види розряду в газах розглядаються на основі аналізу ВАХ (мал. 49).



Мал. 49

Окремим видом газового розряду є *дуговий розряд*, відкритий російським вченим В.В.Петровим у 1802 р.

Електричну дугу можна отримати в умовах шкільного кабінету фізики. Але з огляду на високу яскравість дуги і потужний потік ультрафіолетового випромінювання правила безпеки не дозволяють це робити. При аналізі природи дугового розряду потрібно пояснити роль термоелектронної емісії.

Практичне застосування електричної дуги для зварювання металів вперше було запропоноване російським винахідником М.М. Бенардосом у 1882 році. Значний внесок у розвиток теорії і практики дугового зварювання вніс вітчизняний вчений Є.О.Патон (1870-1953).



**Тліючий розряд.** Газовий розряд такого типу легко отримати в скляній трубці з двома електродами. Якщо електроди трубки під'єднати до джерела високої напруги і почати відкачувати з неї повітря, настане момент, коли майже весь простір між електродами почне світитись, що засвідчить початок розряду в повітрі при зниженому тиску. Причиною такого розряду є автоелектронна емісія з катода трубки під дією сильного електричного поля.

Тліючий розряд використовується в газонаповнених освітлювальних лампах та газосвітних трубках зовнішньої реклами.

**Іскровий розряд.** Виникає при високій напрузі між електродами, якщо потужність джерела струму недостатня для підтримання дугового чи коронного розряду. Іскровий розряд найпростіше одержати за допомогою електрофорної машини, розвівши електроди на відстані 20-30 мм і привівши машину в дію. Яскравим прикладом іскрового розряду в природі є блискавка. Особливості іскрового розряду дозволяють застосовувати його в багатьох технологічних процесах, зокрема, для обробки металів.

**Коронний розряд.** Він спостерігається в повітрі за нормального атмосферного тиску поблизу загострених частин провідника, який перебуває під високою напругою. Цей вид розряду отримав свою назву через специфічну форму, що нагадує корону. Іноді коронний газовий розряд спостерігається перед грозою або під час грози на високих загострених предметах. Заряджена грозова хмара індукує на предметах під собою заряди протилежного знака. Особливо великий заряд збирається на вістрях. А, оскільки, напруженість електричного поля біля вістря є найвищою, то саме там і починається газовий розряд.

Коронний розряд призводить до значних втрат електричної енергії при передачі її високовольтними лініями. Щоб зменшити втрати, доводиться лінійні провідники виготовляти з кількох паралельно з'єднаних дротів, ретельно виконувати кожне електричне з'єднання.

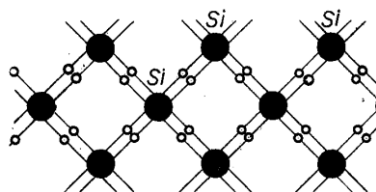
Коронний розряд використовується в електричних фільтрах, які дозволяють здійснювати якісне очищення димових викидів електростанцій та великих підприємств.

**Плазма** – це частково чи повністю йонізований газ, у якому густини позитивно і негативно заряджених частинок практично однакові. Плазма, в цілому, електрично нейтральна система, хоча й містить у собі заряджені частинки. Рівень йонізації плазми може бути різним; а при дуже високій температурі можна отримати повністю йонізовану плазму, в якій повністю будуть відсутні нейтральні атоми. Висока температура плазми свідчить про велику рухливість частинок плазми. У стані плазми перебуває 99% речовини Всесвіту

Рухом плазми можна керувати за допомогою електричного та магнітного полів, а тому електричний струм у плазмі широко використовується в сучасній техніці та технологіях: в МГД генераторах, в плазмотронах для різання і обробки металів, у газонаповнених електричних лампах, у хімічній технології одержання ацетилену і ін.

**Електричний струм у напівпровідниках.** До напівпровідників належать речовини, питомий опір яких, на відміну від металів, із підвищенням температури зменшується.

Для з'ясування причин такої властивості напівпровідників розглядається модель кристалічної ґратки типового напівпровідника – кремнію (Si) (мал. 50). Оскільки цей елемент належить до четвертої групи в періодичній системі Д. Менделєєва, то це свідчить, що кожен атом кремнію має на зовнішній оболонці чотири валентних електрони. При утворенні кристалу кожен валентний електрон починає рухатись по орбіті, що оточує не лише свій атом, але й сусідній. Таким чином, кожна сусідня пара атомів має спільну пару електронів, що рухаються двома спільними орбітами. Такий зв'язок атомів називають ковалентним. У цілому, згідно з моделлю, кожен атом зв'язаний із сусідніми атомами вісьмома орбітами, якими рухаються чотири пари електронів.



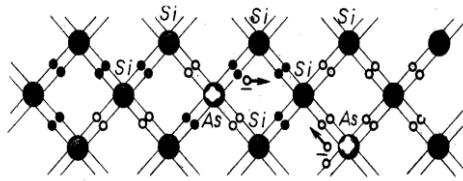
Мал. 50

У хімічно чистих напівпровідниках при температурі поблизу абсолютного нуля вільних носіїв заряду немає. З підвищенням температури кристалу теплові коливання ґратки ведуть до розриву деяких валентних зв'язків. Унаслідок цього частина електронів відщеплюється і стає електронами провідності. За наявності електричного поля вони переміщуються проти поля і створюють електричний струм. Цей механізм провідності не відрізняється по суті від провідності металів. Однак істотною відмінністю від металів, яка визначає виняткові можливості технічного використання напівпровідників, є можливість ще й іншого механізму електропровідності. Він обумовлений тим, що кожен розрив ковалентного зв'язку веде до виникнення вакантного місця, де відсутній зв'язок.

Такі “пусті” місця з відсутніми електронами зв'язку дістали назву “дірок”.

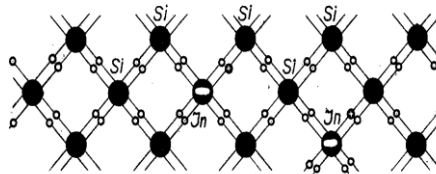
У чистому напівпровіднику під дією зовнішнього електричного поля струм забезпечується як електронами провідності, так і дірками.

Власна провідність напівпровідників за звичайних умов невелика. Оскільки лише один з десяти мільярдів атомів втрачає електрон, вільних носіїв заряду відносно мало. Але, якщо в кристал напівпровідника ввести певні домішки (мал. 51), можна суттєво змінити концентрацію вільних носіїв заряду. Причому, в залежності від типу домішки, можна отримати напівпровідники з переважаючою електронною, чи дірковою провідністю.



Мал. 51

Якщо в кристал кремнію ввести атоми Арсену, електронна провідність напівпровідника зростає у багато разів. Атоми Силіцію мають чотири валентних електрони, а атоми Арсену – п'ять. Чотири з них беруть участь у створенні ковалентного зв'язку атома Арсену з навколишніми атомами кремнію, а п'ятий виявляється слабо зв'язаним з власним атомом і може легко його залишити і стати вільним (мал. 52). Домішки, які легко віддають електрони і збільшують кількість вільних електронів у напівпровіднику, називають донорними. Напівпровідник, в який уведено донорні домішки, називають напівпровідником *n*-типу (від *negativ*). У напівпровіднику *n*-типу електрони – основні носії заряду, а дірки – неосновні.

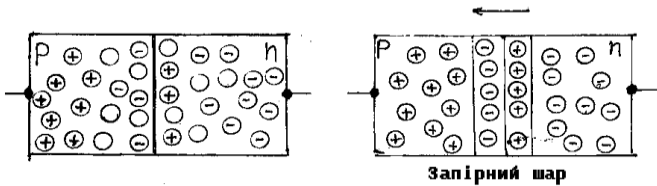


Мал. 52

Якщо ж як домішку використати Індій – елемент третьої групи, атоми якого тривалентні, характер провідності зміниться. Для встановлення нормальних парноелектронних зв'язків з сусідами атому Індію не вистачає електрона. Внаслідок цього утворюється дірка. Кількість дірок у кристалі дорівнює кількості атомів домішок. Такі домішки називаються акцепторними (приймаючими).

Напівпровідник з акцепторними домішками має переважно діркову провідність, а тому дістав назву напівпровідника *p*-типу (від *positiv*). Дірки – основні носії заряду в напівпровіднику *p*-типу, а електрони – неосновні.

Якщо з'єднати два напівпровідника різних типів провідності, почнеться дифузія електронів з напівпровідника *n*-типу в напівпровідник *p*-типу і, навпаки, дірок в напівпровідник *n*-типу. Однак, незважаючи на дифузію, дірки в напівпровіднику *n*-типу не будуть розподілені рівномірно по всьому об'єму. Концентрація їх буде зменшуватись при просуванні вглиб напівпровідника, оскільки дірки будуть рекомбінувати з електронами – основними носіями заряду в напівпровіднику *n*-типу. Так само, концентрація електронів у міру їх просування вглиб напівпровідника *p*-типу від межі розділу буде зменшуватись внаслідок рекомбінації електронів з основними носіями заряду напівпровідника *p*-типу – дірками. На малюнку 53 ці рекомбіновані носії показані кружечками.



Мал. 53

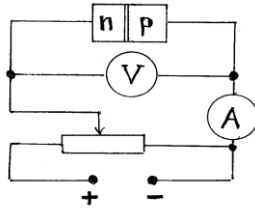
Унаслідок дифузії електронів у напівпровідник *p*-типу, концентрація їх у напівпровіднику *n*-типу поблизу межі розділу зменшиться. Це відбувається ще й тому, що ті дірки, що перейшли з напівпровідника *p*-типу в напівпровідник *n*-типу рекомбінують з тими електронами, що знаходяться поблизу межі розділу, тобто, теж зменшують їх концентрацію. Як наслідок, концентрація електронів в напівпровіднику *n*-типу біля межі розділу настільки зменшується, що їх загальний заряд не зможе компенсувати позитивний заряд атомів-донорів, що віддали свої електрони. Тому в напівпровіднику *n*-типу поблизу межі розділу утворюється позитивний заряд.

Таке ж явище відбувається і в напівпровіднику  $p$ -типу, тільки в ньому біля межі розділу утворюється негативний заряд внаслідок того, що сумарний заряд основних носіїв у напівпровіднику – дірок, які перейшли в напівпровідник  $n$ -типу, не може скомпенсувати негативний заряд атомів-акцепторів, що захопили електрони. Таким чином, на межі розділу двох напівпровідників різної провідності утворюється вузька область, в якій сконцентровано електричні заряди (об’ємний заряд) і пов’язане з ними електричне поле, направлене від напівпровідника  $n$ -типу до напівпровідника  $p$ -типу. Область цього заряду, в якій сильно зменшена концентрація основних носіїв електрики, має більший, у порівнянні з іншими ділянками, електричний опір. Тому ця область називається запірним шаром.

Система, що складається з двох напівпровідників різного типу провідності, розділених запірним шаром, називається електронно-дірковим переходом (або  $p$ - $n$  переходом). Якщо до такого переходу прикласти напругу, причому позитивний полюс джерела під’єднати до напівпровідника  $n$ -типу, а негативний – до напівпровідника  $p$ -типу, то перехід буде ввімкнено в зворотньому або запірному напрямі. У цьому випадку зовнішнє електричне поле додається до електричного поля запірного шару. У результаті ширина запірного шару збільшиться і дифузія дірок з напівпровідника  $p$ -типу і електронів з напівпровідника  $n$ -типу повністю припиниться. Іншими словами, електричний опір запірного шару при його зворотньому ввімкненні дуже великий.

При прямому ввімкненні  $p$ - $n$  – переходу, тобто плюс батареї до  $p$ -області, а мінус – до  $n$ -області, зовнішнє електричне поле буде направлене проти електричного поля запірного шару. У результаті збільшиться концентрація дірок у межовому шарі  $p$ -області і електронів у межовому шарі  $n$ -області, об’ємний заряд переходу зменшиться, а запірний шар звужиться. Як наслідок, відновиться рух електронів в  $p$ -область і дірок в  $n$ -область, тобто, опір переходу зменшиться і через нього піде прямий струм, причому тим більшої сили, чим більшою буде прикладена напруга. Тут важливо повідомити учням, що напівпровідниковий прилад, який має один  $p$ - $n$ -перехід, можна використати за-

мість лампи-діода, оскільки він має односторонню провідність. Ці прилади так і називають – напівпровідникові діоди. ВАХ напівпровідникового діода можна отримати з допомогою електричного кола, показаного на малюнку (мал. 54).



Мал. 54

Напівпровідникові діоди набули широкого застосування в сучасній техніці і електроніці. Основне їх призначення – випрямлення змінного струму і детектування високочастотних радіосигналів.

Для підсилення та перетворення електричних сигналів використовують транзистори – напівпровідникові прилади, у яких використано щонайменше два  $p-n$ -переходи.

До складу сучасних мікросхем входять сотні тисяч транзисторів та діодів.

## 5. Типові задачі

► Система навчальних задач із теми повинна бути підібрана таким чином, щоб акцентувати увагу на основних поняттях та особливостях електричного струму в кожному із середовищ

– Срібною дротиною перерізом  $1 \text{ мм}^2$  протікає струм силою  $1 \text{ А}$ . Обчислити середню швидкість дрейфу електронів у дротині, вважаючи, що кожен атом срібла дає один електрон провідності.

– Алюмінієва дротина при  $0^\circ\text{C}$  має опір  $4,25 \text{ Ом}$ . Який опір цієї дротини при  $200^\circ\text{C}$ ?

– У лампі діоді максимальний анодний струм сягає 100 мА. Скільки електронів емітує катод кожної секунди?

– За який час при електролізі води виділиться 1 г водню, якщо сила струму 1 А?

– Якої товщини шар нікелю відкладеться на деталі за 2,4 год. Її нікелювання, якщо густина струму  $100 \frac{A}{M^2}$ .

– Чому в лініях електропередачі високої напруги застосовують дроти великого діаметру?

– Чому опір кремнію при освітленні змінюється, а міді – ні?

– Чи можна з двох напівпровідникових діодів побудувати транзистор?

## 6. Організація контролю і обліку знань учнів

Оскільки тема досить велика, доцільно наприкінці вивчення струму в кожному із середовищ проводити фізичні диктанти, або самостійні роботи. Перед підсумковою контрольною роботою необхідно провести урок систематизації знань, на якому в ході опрацювання вивченого матеріалу заповнити узагальнюючу таблицю. Підсумкова контрольна робота може містити завдання на визначення рівня володіння теоретичним матеріалом та вміння розв'язувати розрахункові задачі.



### Запитання для самоконтролю

1. Які зміст, структура та основні поняття теми?
2. У чому полягає єдиний підхід до вивчення всіх підтем?
3. Проілюструвати реалізацію єдиного підходу до вивчення всіх підтем на прикладі електричного струму в газах.
4. Як вводиться поняття *p-n*-переходу?
5. На яких прикладах розглядають застосування напівпровідників?



---

## Лекція 12.

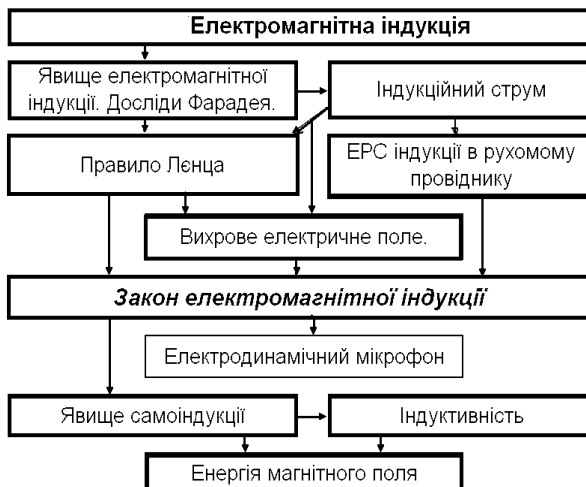
### Методика вивчення теми “ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ”

#### 1. Науково-методичний аналіз змісту та структура теми

Тема “Електромагнітна індукція” є однією з ключових тем розділу “Електродинаміка” програми старшої школи.

При вивченні теми “Електромагнітна індукція” учні вперше знайомляться з явищами, пов’язаними зі змінами електричних і магнітних полів.

Її зміст і структуру показано на структурно-логічній схемі.



Матеріал теми містить декілька вузлових питань, на яких доцільно зосередити увагу учнів: явище електромагнітної індукції, закон електромагнітної індукції, ідеї Максвелла щодо взаємозв'язку змінних електричних і магнітних полів, принцип відносності в явищах електромагнітної індукції, практична значимість цього явища. Фактично весь матеріал, який пов'язаний з електродинамікою нестационарних явищ, базується на явищі електромагнітної індукції. Вчення про електромагнітну індукцію є базою для розуміння учнями матеріалу, що вивчається в наступних темах: “Електромагнітні коливання”, “Електромагнітні хвилі”, “Основи спеціальної теорії відносності”.

Засвоєння теми “Електромагнітна індукція” неможливе без використання учнями знань і вмінь, засвоєних раніше в розділі “Електродинаміка”. Зокрема, володіння поняттями електричного поля, напруженості електричного поля, електрорушійної сили, магнітного поля, вектора індукції магнітного поля, магнітного потоку, сили Лоренца, розуміння умов існування електричного струму та ін.

Для кращого засвоєння учнями поняття електромагнітного поля необхідно розглянути індукване електричне поля в системі відліку, де виявляється змінне магнітне поле. Слід звернути увагу на те, що індукується не ЕРС, а електричне вихрове поле. ЕРС є тільки фізичною величиною, за допомогою якої описують це поле. Саме вивчаючи електромагнітну індукцію, учні вперше знайомляться із взаємозв'язком та взаємозалежністю змінних у часі електричних і магнітних полів, з'ясовують відмінність між індукційним електричним і електростатичним полями.

Особлива увага приділяється з'ясуванню взаємної обумовленості й зв'язку двох явищ: 1) будь-який рух заряджених частинок пов'язаний з магнітним полем; 2) зміна магнітного поля викликає рух вільних заряджених частинок у замкнутому контурі.

Незважаючи на порівняно невеликий об'єм навчального матеріалу та, відповідно час, що відводиться на вивчення явища електромагнітної індукції й інших понять і законів, що розглядаються у цій темі, вона має виключно важливе значення для

подальшого вивчення питань електродинаміки нестационарних процесів.

Політехнічний зміст матеріалу теми “Електромагнітна індукція” передбачає розкриття практичної значимості цього явища для сучасного суспільства. Учення про електромагнітну індукцію – одне з тих фундаментальних питань фізики, на яких ґрунтується дія багатьох сучасних технічних установок. Закон електромагнітної індукції пояснює численні явища в неживій і живій природі, лежить в основі багатьох розділів сучасної електро- і радіотехніки. Явище електромагнітної індукції використовується в електро-механічних генераторах, за допомогою яких виробляється практично вся електроенергія в світі. Тому під час вивчення теми висвітлюються відповідні технічні застосування цього явища.

## 2. Основні поняття теми та їх науково-методичний аналіз

Центральним поняттям теми є поняття *електромагнітної індукції* – виникненні ЕРС індукції у провідному контурі, який знаходиться у змінному магнітному полі, або рухається у постійному магнітному полі. Електромагнітна індукція відкрита англійським фізиком М.Фарадеєм у 1831 році.

Електричний струм, викликаний *ЕРС індукції*, називають *індукційним струмом*. Цей струм може виникнути, якщо провідний контур замкнутий.

*Потік індукції магнітного поля (магнітний потік)* – узагальнене поняття, що характеризує просторову локалізацію магнітного поля. Значення *магнітного потоку* розраховують як добуток площі замкнутого контура на модуль індукції магнітного поля, в якому він знаходиться, та косинус кута між індукцією та нормаллю до площини контура  $\Phi = BS \cos \alpha$ .

Одиницею магнітного потоку в СІ є вебер (1 Вб).

Згідно закону Фарадея, ЕРС індукції в контурі прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку. З урахуванням правила Ленца у системі СІ цей закон записують так:  $\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ .

Записаний у такому вигляді цей закон має універсальний характер і може застосовуватися як у випадку, коли контур пронизує змінне магнітне поле, так і у випадку руху провідника в постійному магнітному полі.

ЕРС індукції дорівнює роботі з переміщення одиничного заряду в замкнутому контурі, яку виконує вихрове електричне поле. Саме *вихрове електричне поле*, згідно теорії Максвелла, породжується в просторі при зміні магнітного поля з часом. Вихрове поле безпосередньо не пов'язане з частинками (тілами), які мають електричні заряди.

При зміні магнітного потоку виникає вихрове електричне поле напруженістю  $\vec{E}$ . Індуковане електричне поле, як і електростатичне поле, характеризується напруженістю  $\vec{E}$ , яка визначається силою, з якою поле діє на одиничний заряд. Фізичну величину, яка характеризує електричне поле і чисельно дорівнює роботі цього поля з переміщення тіла з одиничним зарядом замкнутим контуром називають *ЕРС індукції*.

**Самоіндукція** – окремий випадок електромагнітної індукції і полягає у виникненні ЕРС індукції в тому самому контурі, в якому протікає змінний електричний струм. При протіканні електричного струму провідником, наприклад, обмоткою котушки, навколо нього виникає магнітне поле, яке охоплює увесь оточуючий простір, у тому числі й простір всередині котушки. Якщо сила струму в контурі змінюється, змінюється й магнітне поле, породжене цим струмом, і, відповідно, в контурі виникає ЕРС індукції, яку називають *ЕРС самоіндукції*.

**Індуктивність** – фізична величина, яка характеризує електромагнітні властивості контуру (катушки, провідника) і є визначальною в процесі самоіндукції. Вона залежить від кількості витків, що припадають на одиницю довжини котушки, геометричних розмірів, форми, магнітних властивостей середовища.

Оскільки магнітний потік всередині котушки пропорційний силі струму, то індуктивність є коефіцієнтом пропорційності і визначається відношенням магнітного потоку всередині котушки до сили струму в обмотці  $\Phi = Li$ ;  $L = \frac{\Phi}{i}$ . Одиницею індуктивності в СІ є генрі (1 Гн).

*Якщо внаслідок зміни сили струму в провіднику на 1 А за 1 с у ньому індукується ЕРС самоіндукції 1 В, то цей провідник має індуктивність 1 Гн.*

**Енергія магнітного поля** – це фізична величина, що чисельно дорівнює роботі джерела електричного струму, необхідної для компенсації ЕРС самоіндукції в момент замикання кола.

### 3. Навчальний фізичний експеримент

Фізичний експеримент під час вивчення даної теми передбачає проведення низки демонстрацій та виконання однієї лабораторної роботи. Основні дидактичні завдання, які вирішуються за допомогою демонстраційного експерименту можна розділити на три групи:

Електромагнітна індукція [9, с. 314; 24, с. 151; 35, с. 209]. Виникнення ЕРС індукції в рухомих провідниках [9, с. 314]. Струми Фуко [9, с. 320; 24, с. 159; 35, с. 221]. Самоіндукція [9, с. 322; 24, с. 163; 35, с. 214]. Правило Ленца [9, с. 317; 24, с. 154; 35, с. 213]. Залежність ЕРС індукції від швидкості зміни магнітного потоку [9, с. 317; 24, с. 155]. Залежність ЕРС самоіндукції від індуктивності контура та швидкості зміни сили струму [9, с. 324; 24, с. 169; 35, с. 213].

Програмою передбачено виконання лабораторної роботи “Вивчення явища електромагнітної індукції”. Робота описана в підручниках.

#### 4. Методика вивчення основних питань теми

Пристаючи до вивчення електромагнітної індукції, слід актуалізувати знання учнів про особливості електричного (здатність діяти на нерухомі заряди) і магнітного полів (здатність діяти з певною силою на заряди, що рухаються, причому ця сила залежить від модуля і напрямку вектора швидкості). Це дозволить зробити висновок, що для того, щоб установити, з яким полем доводиться мати справу в даному випадку, потрібно дослідити їх дію на заряджені частинки.

Після цього доцільно познайомити учнів з ідеями Фарадея про єдину природу електричних і магнітних явищ, розповісти про те, як було відкрите явище електромагнітної індукції та його наукову і практичну значимість. На основі серії дослідів учнів детально знайомлять з явищем електромагнітної індукції та його проявами. Змоделювати історичний дослід М.Фарадея можна, використавши універсальний трансформатор з котушками на 120/220 В та 6/12 В і джерело постійного струму на 4-12 В. Котушки на 120 В і 6 В насаджують на осердя трансформатора і замикають магнітопровід ярмом. Котушку на 120 В через вимикач приєднують до джерела струму, а до котушки на 6 В приєднують гальванометр від демонстраційного вольтметра. Замикаючи і розмикаючи вимикач, спостерігають відхилення стрілки гальванометра.

Демонструючи досліди, звертають увагу на наступне:

- 1) котушки ізольовані одна від одної;
- 2) струм у другій котушці виникає лише під час замикання або розмикання кола першої котушки, тобто коли відбувається зміна значення сили струму і пов'язана з ним зміна магнітного поля, яке пронизує витки обох котушок;
- 3) напрям індукційного струму залежить від того чи зменшується, чи збільшується магнітний потік, що пронизує другу котушку, а також від напрямку струму в першій котушці (напрямку вектора магнітної індукції створюваного нею поля).

Дещо змінивши установку (ядро встановлюють на осердя вертикально і одягають на нього другу котушку), демонструють виникнення індукційного струму під час руху котушок одна відносно одної. Слід також показати, що індукційний струм виникає й у випадку руху прямого провідника в магнітному полі, якщо останній перетинає лінії магнітної індукції.

Після цього подібні досліди доцільно провести з котушкою та постійним магнітом.

Аналізуючи результати дослідів учні повинні прийти до таких висновків:

1. Змінне магнітне поле здатне породжувати електричне поле, яке спричиняє виникнення індукційного струму в замкнутому контурі.

2. Напрямок індукційного струму залежить:

а) від характеру зміни магнітного потоку, що пронизує контур (наростає потік, чи спадає), або напрямку руху провідника в магнітному полі;

б) від напрямку вектора магнітної індукції поля.

3. Сила струму індукції в даному замкнутому провіднику залежить від швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує контур.

Аналізуючи різні випадки виникнення ЕРС індукції, підводять учнів до узагальненого висновку, що за будь-якої зміни магнітного потоку, що пронизує контур, у ньому виникає ЕРС індукції (індукційний струм, якщо контур замкнутий) незалежно від того, чим зумовлена зміна потоку. ЕРС індукції відіграє ту ж роль, що й ЕРС джерела струму в колі.

Подальша задача полягає в тому, щоб знайти кількісний вираз закону для визначення ЕРС індукції. Для цього потрібно звернути увагу учнів на те, що з усіх поставлених дослідів впливає висновок про залежність значення індукційного струму, а отже й ЕРС індукції, від швидкості зміни магнітного потоку через замкнутий контур.

Потім розглядають рух провідника у магнітному полі з швидкістю  $v$  і, спираючись на знання учнів про дію сили Лоренца на рухомі заряди, виводять формулу  $\mathcal{E}_i = -Blv\Delta t \sin \alpha$ .

З'ясовують також, що у початковий момент через контур проходить магнітний потік  $\Phi_1$  а коли провідник переміститься –  $\Phi_2$ . За час руху  $\Delta t$  магнітний потік змінився на величину

$$\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = Blv\Delta t \sin \alpha, \text{ отже } \mathcal{E}_i = -vBl \sin \alpha = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

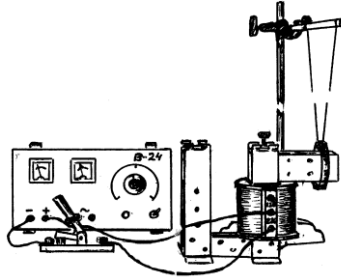
Аналізуючи отриману формулу, підкреслюють, що неодмінною умовою виникнення ЕРС індукції є зміна магнітного потоку, а значення ЕРС залежить від швидкості зміни цього потоку.

Важливим моментом у вивченні теми є встановлення правила для визначення напрямку індукційного струму та знаку ЕРС. Для цього вводять постійний магніт у виток і за відхиленням стрілки гальванометра визначають напрямок індукційного струму у витку. Звертають увагу на те, що магнітний потік, який пронизує контур витка, змінювався, і пропонують учням пов'язати напрям вектора індукції магнітного поля і характер зміни потоку магнітної індукції з напрямком індукційного струму. За напрямком струму, одним з відомих учням способів, визначають напрямок вектора магнітної індукції  $\vec{B}'$  його поля, наприклад у центрі витка, і зміну в тій же точці вектора  $\vec{B}$  магнітного поля магніту. З'ясовують, що коли магніт підводять до котушки, то індукція магнітного поля збільшується. Індукційний струм, що виникає, має такий напрямок, що вектор індукції створеного ним магнітного поля протилежний вектору індукції магнітного поля магніту. Якщо магніт віддаляти – напрямки векторів індукції магнітних полів, створених індукованим у котушці струмом і магнітом, співпадають. Отже, індукційний струм має такий напрямок, що створений ним магнітний потік  $\Phi' = B'S$  перешкоджає зміні магнітного потоку  $\Phi$ , який його спричинив. Використавши прилад для демонстрації правила Ленца перевіряють одержаний висновок і демонструють відсутність індукованого струму у розрізаному кільці.

Додатковим варіантом експерименту може служити дослід, установка для якого показана на (мал. 55). Під час замикан-



ня кола котушки кільце відштовхується від осердя, під час розмикання – притягується.



Мал. 55

Слід звернути увагу учнів на те, що правило Ленца впливає з закону збереження енергії і тому може бути виведене на основі таких міркувань. Піднятий на висоту  $h$  над витком магніт має потенціальну енергію  $W_1 = mgh$ . Якщо немає індукційних струмів (виток не замкнений), то  $mgh = \frac{mv^2}{2}$ , де  $v$  – швидкість магніту на рівні витка. Потенціальна енергія повністю перетворюється в кінетичну. Якщо ж виток замкнений, то в ньому виникає індукційний струм і частина механічної енергії перейде в енергію електричного струму. Швидкість падіння магніту повинна зменшуватися. Отже, магніт повинен відштовхуватися витком, і на стороні витка, зверненої до магніту, виникає однойменний магнітний полюс. Таким чином, приходять до того ж правила Ленца.

Ознайомлення учнів з явищем самоіндукції доцільно провести в такій послідовності.

1. На основі демонстраційного експерименту знайомлять учнів з явищем самоіндукції [9, с. 322; 24, с. 163; 35, с. 214], та з'ясовують його механізм.
2. Змінюючи кількість витків котушки та використовуючи різні осердя показують, що явище проявляється по різ-

ному для різних контурів (провідників) залежно від форм, кількості витків, наявності осердя, способів намотування і ін. Звертають увагу на те, що магнітний потік, який пронизує площу, обмежену контуром, пропорційний силі струму  $\Phi \sim I$  і вводять нову фізичну величину – індуктивність або коефіцієнт самоіндукції контура  $L$ . Тоді значення магнітного потоку, що виникає в контурі під час протікання струму, можна виразити через силу струму і індуктивність так:  $\Phi = LI$ .

3. На основі загального закону електромагнітної індукції дедуктивним шляхом одержують формулу для визначення ЕРС самоіндукції:  $\mathcal{E}_{st} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{L\Delta I}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$  і роблять висновок, що ЕРС самоіндукції пропорційна швидкості зміни сили струму в колі.
4. З'ясовують, що індуктивність визначає ЕРС самоіндукції, яка може виникнути в даному контурі при зміні сили струму в ньому на 1 А за 1 с та вводять одиницю індуктивності 1 Гн як індуктивність такого контура, в якому при зміні сили струму на 1 А за 1 с виникає ЕРС самоіндукції 1 В.
5. Розглядають прояви цього явища в техніці, необхідність врахування та приклади використання.

У тому, що магнітне поле має енергію, учні переконуються при спостереженні спалахування неонові лампочки або лампочки розжарення, приєднаних паралельно котушці, виникнення сильного іскрового розряду, а то й дуги, під час розмикання вимикача в колі з великою індуктивністю та їх аналізу з точки зору закону збереження енергії. Доцільно також привернути увагу учнів на аналогію між проявом самоіндукції та наданням нерухомому тілу певної швидкості. У результаті учні мають прийти до висновку, що явище електромагнітної індукції (самоіндукції)

підпорядковане закону збереження і перетворення енергії. За рівномірної зміни сили струму в контурі, джерело струму виконує роботу проти індукційного електричного поля, яке протидіє наростанню струму. Енергія створеного магнітного поля дорівнюватиме цій роботі, тобто  $W_M = -A = -\mathcal{E}_{si}q = -\mathcal{E}_{si}I_C \Delta t$ . Врахувавши, що  $I_C = \frac{I_{\max}}{2}$ ,  $\Delta I = I_{\max}$  одержують формулу для визначення

енергії магнітного поля контуру із струмом:  $W_M = \frac{LI^2}{2}$  [18, с. 33].

Аналізуючи досліди, з'ясовують, які сили обумовлюють рух електричних зарядів у провідниках. Учням відомо, що на електричні заряди можуть діяти електричні й магнітні сили. Останні в тому випадку, якщо заряди рухаються, наприклад, за наявності струму в провідниках. Оскільки ж на початку досліду струму в провідниках не було, спричинити впорядкований рух електричних зарядів могло лише електричне поле. Його дія спостерігається при зміні магнітного поля. Існування струму в замкнутому контурі свідчить про те, що силові лінії індукційного електричного поля, на відміну від поля електростатичного, замкнуті. Користуючись правилом Ленца, можна визначити напрям вектора напруженості  $\vec{E}$  в кожній точці поля.

На закінчення корисно підвести підсумок вивченого, повторити й узагальнити найважливіші відомості про електричні й магнітні поля, звернувши увагу учнів на наступне.

1. Магнітне поле, що змінюється, спричинює появу особливого вихрового електричного поля, яке й забезпечує рух носіїв зарядів по замкнутому колу. При цьому  $E_{PC}$  індукції тим більша, чим менший час, протягом якого змінюється магнітний потік.
2. Провідний контур є всього лише індикатором індукованого електричного поля, яке може існувати й без нього, зокрема у вакуумі.

### 5. Типові задачі

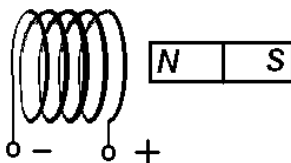
Формування вмій і навичок застосовувати знання, здобуті в процесі вивчення теми, здійснюється на основі розв'язування задач, які за змістом можна поділити на такі види:

► **На визначення напрямку індукційного струму (застосування правила Ленца)**

Визначити напрям руху магніту на основі зображеного на малюнку.

► **На застосування закону Фарадея**

У витку, виготовленому з алюмінієвого дроту довжиною 10 см і площею поперечного перерізу  $1,4 \text{ мм}^2$  (мал. 56), швидкість зміни магнітного потоку  $10 \frac{\text{мВб}}{\text{с}}$ . Знайти силу індукційного струму.



Мал. 56

► **На визначення ЕРС індукції в рухомих провідниках**

Реактивний літак, що має розмах крил 50 м, летить горизонтально зі швидкістю  $800 \frac{\text{км}}{\text{год}}$ . Визначте різницю потенціалів, що виникає між кінцями крил, якщо вертикальна складова індукції магнітного поля Землі дорівнює  $5 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$ . Чи можна використовувати цю різницю потенціалів для вимірювання швидкості польоту літака?

►► **На визначення ЕРС самоіндукції**

Яка ЕРС самоіндукції збуджується з обмотці електромагніту з індуктивністю  $0,4 \text{ Гн}$  під час рівномірної зміни сили струму в ній на  $5 \text{ А}$  за  $0,02 \text{ с}$ ?

►► **На визначення енергії магнітного поля**

При зміні сили струму в котушці, індуктивність якої  $L$ , в  $n$  разів енергія магнітного поля змінилася на  $\Delta W$ . Визначити початкове значення енергії  $W$  та сили струму  $I$ .

►► **Комбіновані задачі**

Два металевих стрижні розташовані вертикально і замкнуті вгорі провідником. По цих стрижнях без тертя і порушення контакту ковзає перемичка довжиною  $0,5 \text{ см}$  і масою  $1 \text{ г}$ . Уся система знаходиться в однорідному магнітному полі з індукцією  $10^{-2} \text{ Тл}$ , перпендикулярному до площини рамки. Швидкість руху перемички, що встановилася –  $1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Знайдіть опір перемички. Опором стрижнів і дроту знехтувати.

## **6. Організація контролю і обліку знань учнів**

Контроль знань учнів доцільно організувати, враховуючи ті дидактичні завдання, які мають бути реалізовані в процесі вивчення теми. Для перевірки якості засвоєння учнями основних понять та формул доцільно провести фізичний диктант.

Для з'ясування рівня сформованості вмінь застосовувати правило Ленца, закон електромагнітної індукції та визначати ЕРС індукції в рухомих провідниках можна провести самостійну роботу, що включає задачі-малюнки на визначення напрямку індукційних струмів за різних умов їх виникнення та розрахункові задачі на визначення ЕРС індукції.

На останньому уроці після узагальнення навчального матеріалу проводять контрольну роботу.



### **Питання для самоконтролю**

1. Які освітні завдання мають бути вирішені під час вивчення теми “Електромагнітна індукція”?
2. Яка послідовність вивчення теми?
3. Які можливі підходи до вивчення явища електромагнітної індукції?
4. Як пояснити правило Ленца з точки зору закону збереження й перетворення енергії?
6. Як ввести поняття індуктивності контуру?
5. Яка роль фізичного експерименту під час вивчення теми?
6. Які демонстрації можуть бути поставлені для перевірки правила Ленца?
7. Які вміння мають бути сформовані в процесі розв’язування задач з теми?
8. Які основні види задач мають бути розв’язані під час вивчення теми?

---

**Лекція 13.**  
**Методика вивчення теми**  
**“МЕХАНІЧНІ КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ”**

**1. Науково-методичний аналіз змісту  
та структури теми**

Коливальні і хвильові рухи є найпоширенішими в природі. Важко знайти таку галузь техніки, де б не застосовувалися чи не враховувалися коливальні і хвильові процеси. Механічні коливання використовують у різних технологічних процесах і машинах. Електромагнітні коливання – основа дії найважливіших електро- і радіотехнічних пристроїв.

Зміст розділів, присвячених вивченню коливань і хвиль, дозволяє переконливо показати діалектичний характер розвитку поглядів, ідей і гіпотез, обмеженість тих чи інших фізичних законів і, разом з тим, постійне вдосконалення людського знання, його постійне розширення і поглиблення, пізнання усе більш прихованих таємниць природи. Яскравим підтвердженням цьому служить, наприклад, історія розвитку поглядів на природу світла.

У нині діючій програмі з фізики для старшої школи в основному передбачається послідовне вивчення коливань і хвиль різної природи. У класах з поглибленим вивченням фізики ці питання можуть розглядатися паралельно. При цьому фундаментальні властивості та методи дослідження коливань і хвиль докладно вивчаються спочатку на якому-небудь одному, найбільш наочному прикладі, а потім вже засвоєні поняття застосовуються до інших випадків із широким залученням аналогій (гармонічні коливання, принцип суперпозиції, графічне відображення та додавання гармонічних коливань, векторні діаграми). У 11 класі до

теми “Електромагнітні коливання” включено низку питань, які передбачають повторення та більш глибоке ознайомлення із загальними властивостями коливних процесів та способами їх опису на прикладі механічних коливань. Потім ці методи застосовуються під час вивчення електромагнітних коливань. Важливого значення під час вивчення коливань і хвиль набувають міжпредметні зв’язки фізики і математики. Досліджуваний матеріал, особливо за програмою для класів з поглибленим вивченням фізики, вимагає суттєвої математичної підготовки учнів, без чого сама ідея “хвильового” концентра і його переваг не можуть бути реалізована повною мірою. З точки зору математичної підготовки учнів вивчення коливань у 11 класі є оптимальним: учні мають достатні знання з математики, у тому числі вже знайомі з деякими питаннями диференціального числення, необхідними для опису і дослідження гармонічних коливань. Загальна структура теми представлена на таблиці. Умовно в темі можна виділити дві відносно самостійні частини: механічні коливання та механічні хвилі.

У першій частині теми формуються первісні загальні поняття про коливання та з’ясовуються умови, за яких вони можуть виникнути. Докладно розглядаються найбільш прості, але надзвичайно важливі рухи, що повторюються – гармонічні коливання. Друга частина теми присвячена ознайомленню учнів з процесами поширення коливань у просторі – хвилями.

Вивчення матеріалу теми передбачає з’ясування загальних властивостей коливань і хвиль, використання однакових методів наукового дослідження.

Специфіка методики вивчення коливань і хвиль виявляється в наступному:

1. Використовується єдиний підхід до формування найважливіших узагальнених понять про коливання та хвилі будь-якої природи: періодичність явищ; величини, які їх характеризують (період, амплітуда, фаза, довжина хвилі та ін.), що полегшує учням засвоєння матеріалу, робить знання більш дієвими.

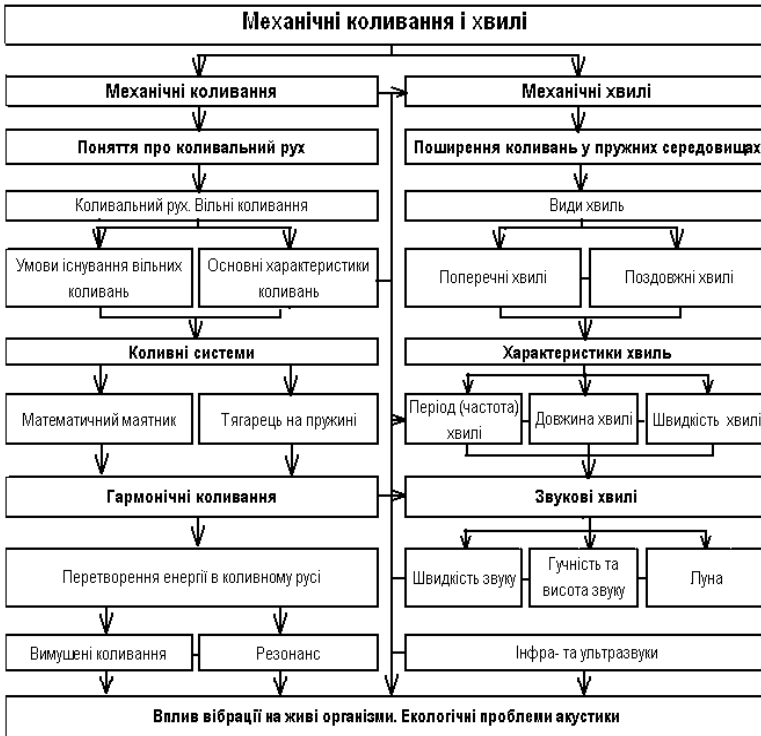
2. Використовується єдиний математичний апарат для кількісного опису коливань різної природи.



3. Єдиний підхід характерний і для навчального фізичного експерименту, що використовується під час вивчення явищ відбивання, заломлення, інтерференції й дифракції механічних та електромагнітних хвиль.

4. Специфіка матеріалу дозволяє широко використовувати аналогії. Однак застосування аналогій не повинне вести до спрощення понять. Будь-які аналогії вірні тільки до визначеної межі, про що повинні знати й розуміти учні.

Структурно-логічна схема теми



## 2. Основні поняття теми та їх науково-методичний аналіз

Основними поняттями, які формуються під час вивчення механічних коливань є поняття про коливання та їх основні види (вільні, вимушені коливання, гармонічні коливання, автоколивання), поняття про коливальні системи (математичний маятник, пружинний маятник, автоколивальна система) та поняття про фізичні величини, що характеризують коливання та стани коливальних систем у той чи інший момент часу (зміщення, амплітуда, частота, період, фаза).

**Коливання** – це процес будь-якої природи, під час якого стан тіла або фізичної системи тіл повторюється через певні проміжки часу. Коливання – найпоширеніша форма руху в навколишньому світі і техніці.

У середній школі розглядають у основному коливання з одним ступенем вільності. Головна увага при цьому приділяється з'ясуванню поняття *гармонічних коливань* як одного з фундаментальних у фізиці. **Гармонічними** вважають коливання, за яких зміни фізичних величин з часом відбуваються за законами синуса або косинуса. Розглядаючи механічні коливання, як один з видів механічного руху, знаходять рівняння руху тіла (матеріальної точки), яке б дозволило визначити його положення у будь-який момент часу. Для гармонічних коливань рівняннями руху є рівняння  $a = -\omega^2 x$  та його розв'язок  $x = x_{\max} \cos(\omega t + \alpha)$ .

**Коливальна система** – це сукупність тіл, у якій можуть відбуватися коливальні рухи, обумовлені внутрішніми силами, що діють у цих системах. Коливання у таких замкнутих коливальних системах називають **вільними коливаннями**. Якщо у коливальній системі можна знехтувати силами тертя, коливання, які у ній виникають, називають **власними**.

З енергетичного погляду коливання є періодичним процесом обміну енергією між різними елементами системи та її перетворення. Для ідеальної коливальної системи повна механічна

енергія зберігається, й у будь-який момент часу дорівнює сумі потенціальної й кінетичної енергії.

З точки зору закону збереження імпульсу коливання в замкнутій системі відбуваються так, що положення центра мас системи залишається незмінним, а переміщення одних частин системи неодмінно обумовлює відповідне переміщення інших частин у протилежному напрямку. У коливальній системі завжди коливається не одне, а кілька тіл. Тому в залежності від умов і поставленої задачі як об’єкта вивчення обирається те чи інше тіло і, відповідно, система відліку. Механічна коливальна система повинна складатися як мінімум із двох взаємодіючих тіл, тому що коливний (змінний) рух тіла можливий тільки при дії на нього сили (іншого тіла), яка періодично змінюється. Прикладом такої системи служать дві однакові масивні кульки, з’єднані пружиною.

**Математичним маятником** називають точкове тіло, підвішене на нерозтяжній і невагомій нитці. Відхилення від положення рівноваги такого маятника не перевищує  $3\text{--}5^\circ$ . Математичний маятник – це поняття абстрактне і служить для спрощення розгляду закономірностей коливального руху.

Інтервал часу, протягом якого тіло здійснює одне повне коливання, називають **періодом коливань**. Період власних коливань залежить від параметрів системи. Період коливань прийнято позначати буквою  $T$ . Відповідно до означення період коливань в СІ вимірюють у секундах.

**Частота коливань** є величиною, що характеризує коливальну систему і показує, яку кількість коливань тіло здійснює за одну секунду. Частоту коливань позначають буквою  $f$ .

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

Одиницею частоти у СІ є  $1 \text{ c}^{-1}$ . Одиницю частоти називають герц (1 Гц).

Величину  $\omega$ , що показує, яку кількість коливань здійснює тіло за  $2\pi$  секунд називають коловою або **циклічною частотою**.

Величину  $x$ , яка характеризує відхилення тіла від положення рівноваги у певний момент часу називають **зміщенням**. Максимальне зміщення тіла від положення рівноваги  $x_{\max}$  називають **амплітудою** коливань. Амплітуду, як і зміщення, за міжнародною системою одиниць вимірюють у метрах.

Величину  $(\omega t + \varphi)$  у рівнянні  $x = A \sin(\omega t + \varphi)$  називають **фазою** коливань, а величину  $\varphi$  – **початковою фазою**. Фаза показує, яка частина періоду пройшла від початку коливань.

**Вимушеними коливаннями** називають коливання, що відбуваються під дією зовнішньої періодичної сили.

Поширення коливань у середовищі називають **хвильовим процесом** або **хвилею**.

**Довжиною хвилі**  $\lambda$  називають відстань між найближчими точками, що коливаються в однаковій фазі. Довжина хвилі – відстань, на яку поширюється хвиля за один період  $\lambda = vT$ . Довжина хвилі в СІ вимірюється в метрах. Швидкість поширення механічної хвилі залежить від пружних властивостей середовища.

Напрямок поширення хвилі зображають **променем**.

**Фронт хвилі** називають геометричне місце точок, до яких дійшли коливання в одній фазі за певний інтервал часу.

**Рівняння біжучої хвилі** має вигляд:  $x = x_{\max} \cos \omega \left( t - \frac{l}{v} \right)$ .

де  $l$  – відстань від місця збурення до розглядуваної частинки в даний момент;  $v$  – швидкість поширення коливання. Воно описує процес поширення хвилі, оскільки показує, що зміщення точок, які коливаються у хвилі є функцією двох змінних – часу  $t$  і відстані  $l$  від джерела коливань.

Залежно від напрямку коливань частинок середовища розрізняють **поперечні** та **поздовжні** хвилі. **Поперечними** називають хвилі, під час поширення яких точки середовища коливаються у площинах, перпендикулярних напрямку поширення хвилі. **Поздовжні хвилі** – це хвилі, під час поширення яких точки пружного середовища коливаються відносно свого положення рівноваги уздовж напрямку поширення хвилі.

Джерела хвиль, які мають однакову частоту і незмінну в часі різницю фаз коливань називають **когерентними джерелами**. Явище додавання хвиль називають **інтерференцією хвиль**.

Огинання хвилями перешкод називають **дифракцією**.

Одним із видів механічних хвиль, які відіграють значну роль у житті людини, є **звукові хвилі**. **Звуковими хвилями** називають хвилі, частота коливань яких лежить у діапазоні від 20 Гц до 20 кГц.

Для звукових хвиль використовують поняття, пов’язані з суб’єктивним сприйняттям звуку, а саме:

- **гучність звуку** – характеризує інтенсивність дії звукової хвилі на орган слуху (вухо), аналог амплітуди механічної хвилі;
- **висота тону** – величина, що характеризує частотну характеристику звукової хвилі, пов’язана з частотою хвилі;
- **тембр звуку** – визначає спектр частот хвиль, які утворюють складну хвилю.

### 3. Навчальний фізичний експеримент

#### Демонстрації

Вільні коливання вантажу на нитці та вантажу на пружині [10, с. 8; 25, с. 5]. Запис коливального руху [10, с. 17; 25, с. 24]. Вимушені коливання [10, с. 17; 25, с. 34]. Резонанс маятників [10; с. 27; 25, с. 34]. Акустичний резонанс [10, с. 27; 25, с. 34]. Поперечні та поздовжні хвилі і їх поширення [10, с. 27; 25, с. 34]. Залежність періоду коливання вантажу на пружині від її жорсткості та маси вантажу [10, с. 22; 25, с. 19]. Залежність періоду коливання вантажу на нитці від її довжини [10, с. 190; 25, с. 14]. Залежність гучності звуку від амплітуди коливань [10, с. 109; 25, с. 125]. Залежність висоти тону від частоти коливань. [10, с. 107; 25, с. 124]. Застосування маятника в годиннику [10, с. 33; 25, с. 39]. Тіла, що коливаються, як джерела звуку [10, с. 97; 25, с. 117]. Застосування ультразвуку [10, с. 125; 25, с. 127].

Проведення фронтального експерименту передбачене у вигляді фронтальної лабораторної роботи “Визначення прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника”.

Низку простих спостережень і дослідів учні можуть провести й у домашніх умовах за допомогою підручних засобів.

#### **4. Методика вивчення основних питань теми**

Вивчення коливань починають із з'ясування поняття про коливальний рух, що є одним з основних у цій темі. Учні вже знайомі з періодичними, тобто такими, які повторюються через рівні проміжки часу, рухами (наприклад, з рівномірним рухом по колу). Різновидом періодичного руху є коливальний рух, тобто такий рух, при якому тіло переміщується від свого положення рівноваги то в одну сторону, то в іншу, тобто рухи, які періодично повторюються. Наводять приклади коливальних рухів і демонструють системи тіл, у яких за певних умов можуть існувати коливання (вертикальний і горизонтальний пружинні маятники, вантаж на нитці, полотно ножівки або лінійка, затиснуті в лещатах, та ін.). Звертають увагу на те, що коливання виникають у коливних системах – тілах чи сукупності кількох тіл, у яких за певних умов можуть виникати коливальні рухи, обумовлені внутрішніми силами. На прикладі цих коливальних систем підкреслюють те загальне, що характерне для кожної з них: 1) наявність стійкого положення рівноваги; 2) фактор інертності, що забезпечує проходження тілом положення рівноваги і, таким чином, виникнення коливного руху замість простого повернення тіла в положення рівноваги; 3) досить мале тертя в системі.

Отже, одна з перших задач при вивченні коливань – формування поняття про коливальні системи. Вирішити її можна за допомогою розгляду конкретних прикладів пружних коливань і коливань під дією сили тяжіння.

Для демонстрації можна використовувати два масивних (1-2 кг) циліндри чи кулі, з'єднані між собою однією чи двома

зігнутими кільцем пластинчастими пружинами. Для компенсації сили тяжіння циліндри підвішують на нитках.

Розтягнувши чи стиснувши пружини, можна одержати ефектні слабо затухаючі коливання тіл в горизонтальній площині. Під час коливань циліндри переміщуються в протилежних напрямках таким чином, що центр мас системи залишається на одному місці. Аналізуючи дослід відмічають таке:

1) рух кожного тіла коливальний, оскільки характеризується зміщенням то в один, то в інший бік від положення рівноваги;

2) коливальна система містить у собі тіла і пружини (нитки, опори і Земля в систему не входять, коливання могли б відбуватися і без них, наприклад, в умовах невагомості);

3) внутрішніми силами, що викликають коливальний рух, є сили пружності пружини;

4) важливе значення для коливального процесу має інертність коливних тіл, тобто їхня маса;

5) під час коливань відбуваються періодичні перетворення потенціальної енергії пружини в кінетичну енергію циліндрів і навпаки.

6) застосування другого закону Ньютона до однієї з кульок дозволяє одержати рівняння її руху [31, с. 40].

Якщо учні вже володіють поняттям первісної, рівняння руху тягарця можна записати у вигляді  $a = -\omega^2 x$ , де  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ .

У результаті, вивчення вільних коливань тягарця на пружині учні мають одержати перше уявлення про те, що коливання характеризуються не тільки повторенням координат тіла, але і повторенням енергетичних станів системи, періодичним перетвореннями енергії з одного виду в іншій (цю закономірність потім використовують для співставлення з енергетичними перетвореннями під час вивчення електромагнітних коливань).

Поняття про властивості коливальних систем далі поглиблюють і закріплюють на прикладі коливань нитяного маятника:

1) рух маятника коливальний, тому що його кулька періодично зміщується від положення рівноваги; 2) коливальна система складається з тіла-кульки, що має стійке положення рівноваги, нитки й Землі; 3) внутрішніми силами, що викликають коливальний рух кульки, є сила тяжіння й сила натягу нитки; 4) важливу роль відіграє інертність кульки; 5) під час коливань відбувається перетворення кінетичної енергії (максимальної в положенні рівноваги) у потенціальну енергію (максимальну в крайньому положенні кульки); 6) застосування другого закону Ньютона до математичного маятника дає можливість одержати рівняння його руху у вигляді  $a = -\omega^2 x$ , де  $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$ .

Підсумовуючи вивчене, звертають увагу на те, що ці ознаки притаманні будь-якій з коливальних систем.

Розглянувши найпростіші коливальні системи, необхідно чітко визначити умови, за яких у них можуть виникати вільні коливання.

З точки зору сил, що діють у системі:

1. Система повинна мати стійке положення рівноваги.
2. При відхиленні тіла від положення рівноваги в системі повинна виникати сила, що прагне повернути його в положення рівноваги.
3. Сили тертя в системі мають бути мінімальними.

З точки зору енергетичних перетворень у системі:

1. Для виникнення коливань система повинна одержати певну енергію від зовнішніх тіл.
2. Робота сил тертя, що діють у системі, за один період коливань повинна бути меншою, ніж одержана системою початкова енергія.



Слід звернути увагу і на поняття “вільні” та “власні коливання”. Коливальна система, позбавлена тертя – ідеалізація, але розходження між вільними і власними коливаннями за малого коефіцієнту згасання дуже незначне і його можна не враховувати (при добротності системи усього в кілька одиниць воно не перевищує декількох відсотків). При викладанні фізики в школі поняття вільних і власних коливань розмежовують не завжди.

Демонструючи коливання математичного та пружинного маятників вводять поняття зміщення як відхилення тіла, що коливається, від положення рівноваги, амплітуди – максимального зміщення, періоду, частоти та фази коливань.

Одне з найважливіших понять теорії коливань – гармонічне коливання. Це поняття широко використовують з двох причин: будь-який періодичний негармонічний рух може бути представлений у вигляді суми низки гармонічних коливань кратних частот, які можна виділити і спостерігати. Крім того, існує багато таких коливальних систем, коливання в яких з великою точністю можна вважати гармонічними.

Можливі кілька підходів до введення поняття гармонічних коливань.

Один з таких підходів полягає в співставленні коливань, наприклад, пружинного маятника і рівномірного руху тіла по колу. Для цього спочатку демонструють, що тінь від кульки, яка рівномірно рухається по колу здійснює коливний рух. Потім одержують вираз для координати проекції на вісь ОХ матеріальної точки, яка рівномірно рухається по колу:  $x = x_{\max} \cos \frac{2\pi}{T} t$  і повідомляють, що рух, при якому координата з часом змінюється за таким законом називається гармонічним коливанням. Потім на тій же установці демонструють, що тінь від кульки, яка обертається і пружинний маятник здійснюють однакові рухи і роблять висновок, що рух маятника може бути описаний тим же рівнянням, тобто теж є гармонічним коливанням.

Інший підхід передбачає розгляд динаміки коливань пружинного і математичного маятника, виведення рівнянь їх рухів

та запис у вигляді диференціального рівняння виду  $x'' = -\omega^2 x$ . Потім показують, що розв'язком цього рівняння є рівняння  $x = x_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0)$  і повідомляють, що коливання, які описуються такими рівняннями називаються гармонічними коливаннями.

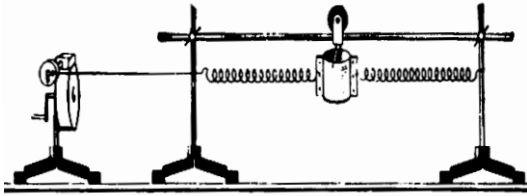
Вивчення вимушених коливань можна організувати так:

1. На прикладах тіл (систем тіл), коливання яких відбуваються під дією зовнішньої періодичної сили (коливання поплавця на хвилях, голки швейної машини) та демонстрації коливань поршня в моделі двигуна внутрішнього згоряння вводять поняття вимушених коливань.

2. За допомогою прикладів різних вимушених коливань і дослідів з'ясовують, що вимушені коливання тіл відбуваються з частотою, яка відповідає частоті прикладання або зміни зовнішньої сили.

3. Повідомляють учням, що особливий інтерес являють собою випадки, коли періодична зовнішня сила діє на систему, в якій можуть відбуватися вільні коливання. Демонструють дослід з пружинним маятником, у якому відбуваються вимушені коливання, використовуючи, наприклад, установку зображену на малюнку 57. Установлюють частоту коливань збуджуючого пристрою більшою чи меншою за власну частоту коливань маятника і звертають увагу, що спочатку маятник здійснює досить складні рухи, а потім, через деякий час в усталеному русі, спостерігаються вже тільки вимушені коливання з частотою, яка відповідає частоті змушуючої сили. На основі цих дослідів роблять висновок, що частота вимушених коливань дорівнює частоті періодичної зовнішньої сили.

Окрему увагу під час вивчення вимушених коливань слід приділити явищу резонансу. На тій же установці (мал. 57) демонструють різке зростання амплітуди вимушених коливань у випадку, коли частота прикладеної періодичної сили наближається до власної частоти системи. Коли частоти збігаються – амплітуда коливань досягає максимуму.



Мал. 57

Зафіксувавши різке зростання амплітуди, коли власна частота коливань і частота змушуючої сили стають однаковими, пояснюють, що це явище називають резонансом. Якщо продовжувати і далі збільшувати частоту змушуючої сили, то можна показати, що амплітуда вимушених коливань починає зменшуватися й при дуже високих частотах, внаслідок інертності системи, вона може стати дуже малою. Учням необхідно пояснити причини різкого зростання амплітуди під час резонансу. Звернувши увагу на те, що за резонансу напрямки сили і швидкості у будь-який момент часу збігаються. Це означає, що змушуюча сила протягом періоду виконує максимальну додатню роботу: вона весь час “підштовхує” коливне тіло, розгойдує систему. Енергія джерела у цей час витрачається на виконання роботи проти сил опору і на збільшення енергії системи, а отже, амплітуди коливань. З ростом амплітуди коливань зростає сила опору, тому все більша частина енергії витрачається на її подолання. За резонансу амплітуда досягає такого значення, що енергія, яка продовжує надходити від джерела в систему, цілком витрачається на подолання опору. Тому амплітуда при резонансі залежить від значення сил опору в системі.

За допомогою кількох нитяних маятників, підвішених на дерев’яній планці (бажано на біфілярних підвісах), доцільно продемонструвати резонанс, коли власна частота одного з маятників збігається з частотою маятника, який виступає як вібратор (маятники беруть такої довжини, щоб принаймні двоє з них були однакові). При цьому демонструють передачу енергії усім маят-

никам і відзначають, що резонанс спостерігається для того маятника, який має ті ж параметри, що й вібратор.

Особливу увагу слід приділити питанням врахування резонансу в техніці, використанню резонансних явищ у житті. Приводять приклади шкідливого впливу резонансу (руйнування опор під невірноваженими конструкціями), вказують основні шляхи запобігання резонансу (зміна власної частоти коливань системи і використання демпферів).

Розглядаючи використання резонансу, доцільно ознайомити школярів із принципом дії і роботою резонансного тахометра, із проблемою вимірювання власних частот деталей конструкцій.

**Вивчення механічних хвиль** як поширення коливань у пружних середовищах починають з формування загальних уявлень про хвильовий рух.

1. З'ясовують механізм поширення коливань у пружних середовищах: коливання передається від одного коливного тіла (частинки) до іншого за наявності зв'язку між ними. Це можна продемонструвати спочатку на двох зв'язаних маятниках, потім на зв'язаних між собою коливальних системах різної конструкції. Зв'язок може здійснюватися завдяки силам пружності, магнітної взаємодії, сил поверхневого натягу та гравітаційних сил.

2. Вводять поняття про поперечні та поздовжні хвилі і, використовуючи приклади та демонстрації з'ясовують особливості їх поширення.

3. Виділяють характерні риси, притаманні хвильовим процесам:

- перенесення речовини не відбувається;
- частинки середовища, які коливаються, не переміщуються на значні відстані;
- у просторі відбувається передача і поширення енергії.

4. З'ясовують поняття швидкості поширення хвилі, під якою фактично розуміють фазову швидкість – швидкість поширення гребеня або западини для поперечної хвилі, згущення чи розрідження для поздовжньої хвилі. Показують залежність шви-

дкості поширення хвилі в середовищах від їх пружних властивостей.

5. Уводять поняття довжини хвилі. Учні вже знайомі з поняттям фази коливань. Тому довжину хвилі (позначають  $\lambda$ ) можна визначити як відстань між двома найближчими точками, що коливаються в однаковій фазі, в напрямку її поширення. Слід також звернути увагу на те, що довжина хвилі може розглядатися як відстань, на яку поширилася хвиля за один період. При цьому, якщо швидкість хвилі позначити  $v$ , то за час, що відповідає одному періоду  $T$ , вона пошириться на відстань  $\lambda = vT$ .

6. Ознайомлюють учнів з поняттями фронту хвилі як геометричним місцем точок, до яких дійшли коливання в певний момент часу, і променя.

Явища відбивання, заломлення, інтерференції, дифракції та умови їх проявів доцільно розглянути на прикладі поширення хвиль на поверхні води на основі демонстрацій із використанням хвильової ванни. Розгляд цих явищ, які добре спостерігаються на прикладах поширення механічних хвиль, дозволяє підготувати учнів до сприйняття відповідного матеріалу при розгляді електромагнітних хвиль радіо- та оптичного діапазонів.

На завершення розглядаються звукові хвилі. З'ясовують можливості їх одержання та особливості поширення в різних середовищах, розглядають їх основні характеристики та знайомлять з явищами, які підтверджують їх хвильовий характер.

Під час вивчення звукових хвиль у класах філологічного, універсального, технологічного профілів у основному обмежуються формуванням понять гучності й висоти тону. На конкретних дослідах розкриваються сутність явищ акустичного резонансу й луни, пояснюються їх значення й застосування в музичних інструментах та ехолоті.

## 5. Типові задачі

Серед задач, що пропонуються учням для формування практичних вмінь і навичок застосовувати здобуті знання можна виділити:

**► На використання формул періоду власних коливань математичного і пружинного маятників та довжини хвилі**

– Як відносяться довжини математичних маятників, якщо за один і той самий час один з них робить 10, а другий 30 коливань?

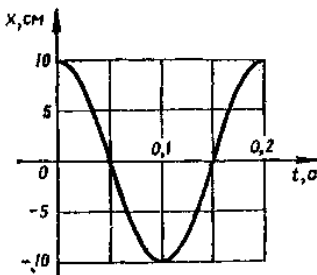
– Визначити масу вантажу, який на пружині, що має жорсткість  $250 \frac{H}{m}$ , робить 20 коливань за 16 с.

– Як зміниться хід годинника з маятником на металевому стержні: а) з підвищенням температури; б) при піднятті на гору; в) при переміщенні від полюса до екватора?

**► На визначення характеристик коливних і хвильових процесів за їх рівняннями і графіками**

За графіком, поданим на мал. 58: а) визначити амплітуду, період, частоту та циклічну частоту коливань; б) написати рівняння залежності  $x = x(t)$ ; в) знайти зміщення коливної точки

при фазах  $\frac{\pi}{2}$  і  $\frac{2\pi}{3}$  рад; г) визначити зміщення через 0,1 с та 0,15 с після початку відліку часу.



Мал. 58

►► **На побудову графіків коливань за їх рівняннями**

Амплітуда коливань 10 см, а частота 0,5 Гц. Написати рівняння залежності  $x = x(t)$  і побудувати його графік. Визначити фазу і зміщення через 1,5 с. Через який час зміщення буде 7,1 см?

►► **На визначення швидкості поширення звуку, довжини звукових хвиль, та визначення відстані до предметів методом ехолокації**

– Частотний діапазон рояля від 90 до 9000 Гц. Визначити діапазон довжин звукових хвиль у повітрі

– Хто частіше махає крильцями під час польоту – комар, чи муха?

## **6. Організація контролю та обліку знань учнів**

Контроль знань і оцінювання навчальних досягнень учнів здійснюють протягом всього часу вивчення теми. Одним із видів контролю можуть бути фізичні диктанти, у які поряд із запитаннями, що передбачають виявлення знання тих чи інших фізичних величин, і формул, що встановлюють зв'язки між ними, доцільно включити прості завдання, за допомогою яких можна з'ясувати, чи можуть учні застосовувати ці знання в конкретних ситуаціях.

Таких диктантів, які не займають багато часу на уроці, можна провести 2-3 протягом вивчення теми.

Доцільно також провести самостійну роботу, включивши до неї завдання на розрахунок величин, що характеризують коливні системи і хвилі та на аналіз рівнянь коливних рухів і їх графіків.

На завершення теми проводять підсумкову контрольну роботу.



### **Питання для самоконтролю**

1. У чому полягають особливості вивчення механічних коливань та хвиль у шкільному курсі фізики?
2. Які основні питання розглядаються в темі?
3. Які види механічних коливань розглядаються в шкільному курсі фізики?
4. Чим обумовлені особливості методики вивчення вільних і вимушених коливань, хвильових процесів?
5. Яка послідовність вивчення гармонічних коливань?
6. Яка роль демонстраційного експерименту під час вивчення теми?
7. Яка послідовність формування поняття механічної хвилі?
8. Які основні види задач розв'язуються під час вивчення теми?



---

## Лекція 14.

### Методика вивчення теми “ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ”

#### 1. Науково-методичний аналіз структури та змісту теми

Тема “Електромагнітні коливання” – одна з найскладніших для сприйняття учнями, оскільки вимагає комплексного застосування всіх раніше здобутих знань, досить високого рівня розвитку абстрактного мислення учнів, належної математичної підготовки. Але це й одна з найцікавіших тем курсу. Тема дозволяє узагальнити вивчений раніше матеріал про коливання, надає широкі можливості для творчості вчителя, його самореалізації й залучення до творчості учнів.

Особливості методики вивчення теми “Електромагнітні коливання” обумовлені:

- значенням вчення про електромагнітні коливання для сучасної фізики і техніки;
- світоглядною роллю теми як важливої ланки у формуванні природничо-наукової картини світу;
- місцем теми в системі курсу фізики та тими завданнями, які мають бути розв’язані в процесі її вивчення.

У змісті теми реалізовано єдиний підхід до вивчення коливань і хвиль різної природи.

У його основу покладено те, що механічні і електромагнітні коливання різної природи мають однакові закономірності і описуються однаковими диференціальними рівняннями.

Такий підхід, дає змогу полегшити сприйняття й засвоєння учнями навчального матеріалу, дозволяє використати сучасний фізичний експеримент і, разом з тим, з’ясувати відмінності в природі механічних і електромагнітних коливань.

У темі можна виділити такі взаємопов'язані і логічно завершені частини: вільні коливання, автоколивання, вимушені коливання, виробництво, передавання і використання електроенергії (див. структурно-логічну схему).

***Основні завдання, що стоять перед учителем під час вивчення теми***

- З'ясувати механізм виникнення вільних електромагнітних коливань та енергетичні перетворення в коливальному контурі.
- Сформувані уявлення про гармонічні коливання, їх основні характеристики та з'ясувати залежність частоти коливань у контурі від його параметрів.
- Познайти учнів з автоколиваннями та автоколивальними системами, домогтися усвідомлення учнями принципу дії генератора незатухаючих коливань (на транзисторі) як автоколивальної системи.
- Сформувані уявлення про змінний струмом – один із найпоширеніших видів вимувених електромагнітних коливань.
- Дати поняття про резонанс в електричному колі та умови його виникнення, використання резонансу і запобігання йому.
- Ознайти з промисловими способами виробництва, передавання та використання електроенергії. Сформувані знання про будову, принцип дії та призначення трансформатора. Ознайти учнів із соціально-економічним значенням розвитку енергетики України. Розкрити екологічні та енергозберігаючі проблеми, що постають із розвитком енергетики, способи їх розв'язання [34, с. 22].

## Структурно-логічна схема теми

*Серед особливостей теми можна виділити наступні*

У залежності від рівня вивчення матеріалу та профілю класу переважаючими в організації навчальної діяльності учнів можуть бути обрані емпіричні чи теоретичні методи і, відповідно, індуктивний або дедуктивний підходи до з'ясування тих чи інших питань. Індуктивний підхід частіше використовується під час вивчення фізики у класах гуманітарного та універсального

профілів, дедуктивний – ширше застосовується в класах з поглибленим вивченням фізики.

Незалежно від обраного підходу передбачається широке використання фізичного експерименту, який виступає не лише як джерело знань та критерій правильності одержаних теоретично висновків, а й знайомить з сучасними методами і засобами експериментальних досліджень (зокрема осцилоскопічним).

Використання аналогій між механічними та електромагнітними коливаннями. Учні на прикладі механічних коливань вже познайомилися з поняттями вільних і вимушених коливань та величинами, які їх характеризують. Це розширює можливості застосування аналогій, моделей, співставлень у процесі вивчення електромагнітних коливань. Учні зустрічаються з новими фізичними моделями – ідеальний коливальний контур, гармонічні електромагнітні коливання.

Широке використання міжпредметних зв'язків, зокрема з курсом математики (тригонометричні функції та їх графіки, похідні, гармонічні коливання, диференціальні рівняння та ін.).

Постійна опора на знання матеріалу вивчених раніше тем курсу фізики (внутрішньо предметні зв'язки), зокрема з темами “Електричне поле”, “Магнітне поле”, “Електромагнітна індукція”, “Механічні коливання”.

Використання енергетичного підходу та застосування закону збереження і перетворення енергії для пояснення процесів, що відбуваються в коливальних системах.

## **2. Основні поняття теми та їх науково-методичний аналіз**

Серед найважливіших понять, які мають бути засвоєні під час вивчення теми вивчаються в темі можна виділити такі: електромагнітні коливання, вільні електромагнітні коливання, коливальний контур, автоколивання, вимушені електромагнітні коливання, період, частота, фаза електромагнітних коливань, змінний струм, діючі значення сили струму та напруги, активний, індуктивний та ємнісний опори, електричний резонанс.

**Електромагнітні коливання** – періодичні або майже періодичні зміни заряду, сили струму, напруги.

Електричне коло, що складається з котушки і конденсатора називається *коливальним контуром*. Основними фізичними величинами, що характеризують коливальний контур (параметри контура), є його індуктивність, ємність та активний опір. Якби в контурах були відсутні втрати енергії, то коливання в них відбувалися б нескінченно довго. Такі коливання називають *власними*, а контури *ідеальними*. У коливальному контурі можуть відбуватися *вільні електромагнітні коливання*, які завжди є затухаючими внаслідок втрат енергії на нагрівання провідників, осердь, випромінювання в простір.

Поняття *періоду, частоти, фази* електромагнітних коливань уводять за аналогією з відповідними характеристиками механічних коливань.

**Вимушені електромагнітні коливання** – коливання сили струму, заряду та напруги в електричних колах; вони відбуваються під дією змінної ЕРС зовнішнього джерела струму.

**Автоколивання** – незатухаючі коливання, що підтримуються в коливальній системі за рахунок енергії джерела, надходження якої регулюється самою системою. Характер цих коливань визначається властивостями системи – генератора незатухаючих коливань.

**Змінний струм** – електричний струм, що змінюється з часом. У техніці під змінним струмом розуміють змінний струм, середнє за період значення сили струму і напруги якого дорівнює нулю. У середній школі на уроках фізики розглядають змінний струм, який протікає у колі внаслідок дії прикладеної до нього ЕРС, яка змінюється за гармонічним законом синуса або косинуса.

Навантаження, в якому вся енергія електричного струму перетворюється на інший вид енергії, називають **активним навантаженням**, а опір цього навантаження **називають активним опором**. Такі навантаження, в яких енергія не перетворюється на інші види, називають **реактивними**. Опори таких навантажень називають реактивними опорами. У колах змінного струму розрізняють індуктивні і ємнісні реактивні навантаження, а їх опори називають відповідно **індуктивними чи ємнісними**.

### 3. Навчальний фізичний експеримент

Програмами для профільних класів [34] при вивченні теми передбачено постановку, зокрема, таких демонстрацій.

Вільні електромагнітні коливання низької частоти в коливальному контурі [10, с. 38; 25, с. 59]. Залежність частоти вільних електромагнітних коливань від електроємності та індуктивності контуру [10, с.40; 25, с. 62]. Осцилограми змінного струму [10, с. 43; 25, с. 67]. Незатухаючі електромагнітні коливання в генераторі на транзисторі [25, с. 87]. Електричний резонанс [10, с. 57; 25, с. 84; 36, с. 22]. Виникнення змінного струму під час обертання рамки в магнітному полі [10, с. 63; 25, с. 88]. Будова і принцип дії генератора змінного струму (на моделі) [10, с. 63; 25, с. 89; 13, с. 31 ]. Випрямлення змінного струму колектором та за допомогою діодів [10, с. 66]. Будова і принцип дії трансформатора [10, с. 67; 25, с. 90 ]. Передача електроенергії на відстань за допомогою підвищувального та знижувального трансформаторів. [10, с. 70; 25, с. 94].

Залежно від наявного у кабінеті фізики обладнання учитель може обирати різні варіанти постановки демонстрацій, розширити їх перелік.

Фронтальні лабораторні роботи передбачені лише в програмах з фізики для класів фізико-математичного профілю. Їх дві: “Вимірювання опору конденсатора в колі змінного струму” та “Вимірювання опору котушки у колі змінного струму”.

### 4. Методика вивчення основних понять теми

Вивчення теми починається із з'ясування поняття електромагнітних коливань та знайомства із способами їх отримання.

Послідовність може бути такою.

1. Оскільки коливання різної природи мають спільні закономірності, і під час їх опису використовуються однакові характеристики (амплітуда, частота, фаза коливань та ін.) доцільно спочатку пригадати матеріал, що розглядався під час вивчення механічних коливань, виділити ключові моменти і загострити на

них увагу учнів (у психологічній теорії інтеріоризації це називають виділення опорних точок).

*Такими “опорними точками” є*

- поняття коливань як процесів, що періодично повторюються;
- поняття коливальної системи як системи взаємозв'язаних тіл, в якій відбуваються коливання;
- умови, за яких у системі можуть відбутися коливання.

2. Пригадують особливості коливань тягарця на пружині, математичного маятника та з'ясовують, що рівняння коливань математичного маятника і тягарця на пружині в ідеальному випадку має вигляд  $x'' = -\omega^2 x$  і його розв'язком є рівняння виду  $x = X_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$ , а коливання, що відбуваються за цим законом є гармонічними.

3. Розповідають про відкриття електромагнітних коливань. Савар у 1826 р., помітив, що неможливо передбачити поляриність намагнічування сталевієї спиці, вставленої в котушку під час розряду через неї лейденської банки. Генрі, Гельмгольц, Федерсон, фотографуючи іскри в обертовому дзеркалі, довели, що цей процес розряду є коливним.

4. Уводять поняття про коливальний контур, як систему, в якій можуть відбуватися вільні електромагнітні коливання. Розглядають коливання в контурі:

1) аналізують можливість виникнення коливань з точки зору застосування закону збереження і перетворення енергії до процесів, що відбуваються в контурі як замкнутій системі;

2) з точки зору особливостей розряду конденсатора через котушку, що має індуктивність.

Доцільно з'ясувати, як змінюватимуться значення заряду, напруги, сили струму в коливальному контурі з часом та побудувати графіки їх зміни за період.

5. Проводять демонстраційний експеримент, що переконує у виникненні коливань під час розряду конденсатора через котушку. При цьому звертають увагу на неможливість безпосе-

реднього спостереження цих коливань і необхідність їх перетворення в інші види коливань.

6. Встановлюють аналогії між процесом коливань тягарця на пружині і коливаннями в контурі та визначають величини-аналоги (див. табл.).

Величини – аналоги в механічних і електромагнітних коливаннях

Механічні величини		Електромагнітні величини	
Маса	$m$	Індуктивність	$L$
Жорсткість пружини	$k$	Величина, обернена ємності	$\frac{1}{C}$
Зміщення	$x = x_{\max} \cos \omega t$	Заряд	$q = q_{\max} \cos \omega t$
Швидкість	$v = v_{\max} \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$	Сила струму	$i = i_{\max} \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$
Прискорення	$a = a_{\max} \cos(\omega t + \pi)$	Швидкість зміни струму	$i'$
Кінетична енергія	$\frac{mv^2}{2}$	Енергія магнітного поля	$\frac{Li^2}{2}$
Потенціальна енергія	$\frac{kx^2}{2}$	Енергія електричного поля	$\frac{q^2}{2C}$



Наступним етапом у вивченні вільних коливань у контурі є доведення їх гармонічності, одержання формули для визначення періоду коливань (формули Томсона) та встановлення зв'язку періоду коливань з параметрами контуру.

Якщо вивчення цього питання здійснюється на основі дедуктивного підходу, то, використовуючи закон збереження енергії, одержують рівняння коливань для ідеального коливального контуру  $q'' = -\omega^2 q$ , де  $\omega^2 = \frac{1}{LC}$ .

Аналізуючи одержане рівняння, за аналогією до рівняння коливань тягарця на пружині приходять до висновку, що коливання в ідеальному коливальному контурі є гармонічними, оскільки його розв'язком є рівняння виду  $q = q_{\max} \cos(\omega t + j_0)$  і встановлюють зв'язок частоти та періоду коливань з параметрами контура – одержують формулу Томсона.

Залежність періоду коливань від ємності та індуктивності можна перевірити експериментально, склавши демонстраційну установку за однією з відомих схем [10, с. 83; 25, с. 59].

Для класів гуманітарного профілю доцільно на основі демонстраційного експерименту лише показати залежність періоду коливань у коливальному контурі від ємності та індуктивності та продемонструвати їх осцилограми.

Традиційно складним для учнів є вивчення електромагнітних автоколивань.

Існуючі програми [34] передбачають вивчення автоколивань лише на прикладі електромагнітних коливань. Проте, з'ясування цього питання має важливе політехнічне значення і дозволяє узагальнити матеріал теми, що вивчався раніше. Автоколивальні системи й автоколивання знаходять широке застосування в різних галузях техніки, проявляються в природних явищах (годинникові пристрої різних типів, генератори електромагнітних коливань, сигнали повороту в автомобілях, різні пульси парні пристрої, двигуни внутрішнього згорання, свисти під час увімкнення мікрофонів у залі, гудіння водогінних труб та багато інших явищ і процесів пов'язані з автоколиваннями).

Логічним переходом до вивчення автоколивань служить обговорення питання про неминучі втрати енергії вільних коливань у коливальному контурі і практичні потреби одержання незатухаючих коливань.

Вивчення автоколивань доцільно провести в такій послідовності.

1. На прикладі одержання незатухаючих механічних автоколивань з'ясовують необхідні елементи та загальну структуру будь-якої автоколивальної системи:

- а) наявність коливальної системи;
- б) необхідність періодичного поповнення енергії коливальної системи за рахунок джерела, що входить до складу цієї системи;
- в) наявність в системі спеціального ключа, який забезпечував би періодичне надходження енергії до коливальної системи;
- г) наявності спеціального пристрою, який слідкує за станом коливальної системи і видає команди ключу, який вмикає джерело, що постачає енергію системі раз на період у певний момент часу (системи зворотного зв'язку).

2. Будують загальну структурну схему (блок-схему) автоколивальної системи.

3. З'ясовують можливості створення автоколивальної системи для одержання електромагнітних незатухаючих коливань, враховуючи їх особливості (високі частоти, струми, поля) та проектують таку систему.

4. Проектують, збирають і перевіряють модель такої системи – генератор на транзисторі та з'ясовують особливості його функціонування.

5. Знайомлять учнів з можливостями застосування генератора незатухаючих коливань на транзисторі.

Після вивчення вільних електромагнітних коливань та автоколивань школярів знайомлять з **вимушеними коливаннями**. Вивчаючи механічні коливання, учні вже знайомилися з понят-

тям вимушених коливань. Відмітивши велике практичне значення одержання незатухаючих коливань, з’ясовують можливість виникнення вимушених коливань під дією зовнішньої періодично змінної ЕРС.

Основна увага при вивченні вимушених електромагнітних коливань приділяється змінному струму. Вивчення цього питання має велике практичне і політехнічне значення. Важливо, щоб учні сприймали змінний струм саме як вимушені електричні коливання в колі. При цьому є можливість зіставити закономірності, які вже були з’ясовані під час вивчення механічних вимушених коливань з відповідними закономірностями для вимушених електричних коливань (частота вимушених коливань співпадає з частотою прикладеної напруги, явище резонансу та ін.). Разом з тим учні, які вивчають фізику на поглибленому рівні, повинні засвоїти нові поняття, специфічні саме для змінного струму: діючі значення сили струму і напруги, фізична сутність активних і реактивних опорів і способи їх обчислення та експериментального визначення, принцип дії генераторів змінного струму та перетворення змінного струму за допомогою трансформаторів та ін.

Розглянувши теоретично обертання рамки з провідника в однорідному магнітному полі, учні переконуються в можливості одержання ЕРС, яка змінюється за гармонічним законом. При цьому частота зміни ЕРС визначається частотою обертання рамки. Оскільки внаслідок обертання рамки з кутовою швидкістю  $\omega$  магнітний потік у будь-який момент часу  $\Delta\Phi = BS \cos \omega t$ . При

цьому виникає ЕРС індукції, яка дорівнює:  $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = BS\omega \sin \omega t$ .

Максимального (амплітудного) значення ЕРС набуває при  $\sin \omega t = 1$ , Тому  $\mathcal{E}_m = BS\omega$ . З врахуванням цього  $\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_m \sin \omega t$ .

Використавши закон Ома показують, що в зовнішньому колі виникне струм, сила струму якого теж змінюватиметься за гармонічним законом – змінний струм.

Для підтвердження одержаних висновків щодо можливості одержання змінної ЕРС під час обертання рамки в магнітному полі використовують демонстраційний експеримент та демонструють осцилограми змінного струму [10, с. 43; 36, с. 31]. Слід також звернути увагу на такі два моменти: 1) показати, що сила змінного струму, як і постійного, визначається прикладеною до кола напругою; 2) можна вважати, що процеси у колах змінного струму (при низьких частотах) носять квазістаціонарний характер, тобто можна вважати, що в кожен окремо взятий момент сила струму на всіх ділянках кола однакова.

Поставивши завдання з'ясувати, за допомогою яких величин можна характеризувати дії змінного струму та аналізуючи його в електричних колах, показують необхідність визначення середньої за період потужності та введення характеристик, які дозволили б кількісно порівнювати дії змінного струму з діями, які спричинює в цих же колах постійний струм. Так, врахувавши, що миттєва потужність  $p = iu = I_m U_m \cos^2 \omega t$  та провівши математичні перетворення одержують:

$$p = \frac{1}{2} I_m U_m (1 + \cos 2\omega t) = \frac{1}{2} I_m U_m + \frac{1}{2} I_m U_m \cos 2\omega t .$$

Оскільки середнє за період значення  $\cos 2\omega t$  дорівнює нулю, то середня потужність за період визначається рівністю:

$$\bar{p} = \frac{1}{2} I_m U_m .$$

Потужність постійного струму визначається, як відомо, за формулою  $P = IU$ . Порівнюючи два останні вирази, з'ясовують, що змінний струм спричинятиме в колі таку саме дію як і постійний, сила струму і напруга якого у  $\sqrt{2}$  менші за відповідні амплітудні значення даного змінного струму. Ці значення і називають діючими значеннями сили струму і напруги:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} .$$

Для закріплення цих понять доцільно порівняти амплітудні та діючі значення різних змінних струмів. Слід звернути увагу учнів на те, що шкали всіх вимірювальних приладів градуують-

ся так, що вони показують діючі значення вимірюваних величин. Проте це не означає, що можна не враховувати миттєвих значень. Для прикладу можна запропонувати визначити напруги в колах постійного і змінного струмів, у які можна включати той чи інший конденсатор, відповісти на питання, чому стався пробій конденсатора, розрахованого на напругу 250 В, коли його ввімкнули у коло з напругою 220 В.

Вивчення понять активних та реактивних опорів можна здійснювати використавши “послідовний” чи “паралельний” спосіб їх введення.

У першому випадку послідовно з’ясовують поняття активного, ємнісного та індуктивного опорів у одній логічній послідовності:

1) вводиться поняття відповідного опору у колі змінного струму, з’ясовують механізм та демонструють відповідні відмінності у порівнянні з колами постійного струму, що містять аналогічні елементи;

2) встановлюють фазові співвідношення між силою струму і напругою у колах з відповідними елементами;

3) уводять формули для визначення відповідних опорів;

4) розглядають перетворення енергії в колах, що містять лише активний, індуктивний чи ємнісний опір.

При другому способі організації вивчення відповідних понять спочатку з’ясовують, як впливають на протікання змінного струму, в порівнянні з постійним, резистори, конденсатори, котушки індуктивності та розглядають причини відмінностей (якщо вони є). Далі вводять поняття активних та реактивних опорів та встановлюють від чого і як вони залежать. Потім розглядають фазові співвідношення в колах, які містять той чи інший елемент. У обох випадках вивчення цих понять, залежно від рівня вивчення матеріалу, профілю класу та інших конкретних умов навчального процесу може здійснюватися на основі дедуктивного чи індуктивного підходів.

Учні знають, що провідники чинять певний опір протіканню струму. Внаслідок прикладання до кола синусоїдальної ЕРС електрони в провідниках здійснюють вимушені коливання. Про-

тягом кожного півперіоду електрони впорядковано рухаються, аналогічно впорядкованому рухові електронів у колах постійного струму. Відповідно, кола змінного струму теж повинні чинити певний опір його протіканню, а струм – спричиняти нагрівання провідників, що і спостерігається в електронагрівальних приладах. Після обговорення цього питання вводять поняття активного опору як опору, що спричиняє необоротні перетворення електричної енергії змінного струму у теплову (внутрішню) енергію.

Слід мати на увазі, що активний опір також залежить від частоти струму. При великій частоті починає проявлятися поверхневий ефект (скін ефект), що еквівалентне зменшенню поперечного перерізу провідника і призводить до збільшення активного опору. Проте для струмів частотою 50-60 Гц цим ефектом можна нехтувати. Тому з явищем скін ефекту доцільно знайомити лише у класах з поглибленим вивченням фізики.

Як відомо, при активному опорі між струмом і напругою немає зсуву фаз. Це можна продемонструвати за допомогою двопроменевого осцилографа, або осцилографа з комутатором. Можна скористатися і генератором наднизької частоти, конструкцію якого описано в посібнику [25]. Саме тому для миттєвих та діючих значень сил струмів і напруг справджується закон Ома

$$i = \frac{u}{R}.$$

Якщо використовується індуктивний підхід, то вивчення особливостей протікання змінного струму з ємністю можна почати з постановки дослідів. Зокрема, складають коло, що містить лампочку та батарею конденсаторів і джерело спочатку постійного, а потім змінного струму. Звертають увагу, що в колі, яке містить конденсатор, приєднаній до джерела змінної напруги, змінний струм протікає. Повідомляють, що опір, який визначається ємністю ділянки кола, якою протікає змінний струм, називають ємнісним опором. Змінюючи ємність конденсатора та частоту прикладеної до цієї ділянки напруги, встановлюють якісну залежність ємнісного опору від ємності конденсатора та частоти змінного струму. Далі проводять теоретичний аналіз процесів у колах

з ємністю. Якщо напруга прикладена до кола, що містить лише конденсатор, змінюється за законом  $u = U_{\max} \cos \omega t$ , тоді

$$q = Cu = CU_{\max} \cos \omega t; \quad i = q' = CU_{\max} \omega \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Порівнюючи рівняння для струму і напруги роблять висновок, що сила струму випереджає напругу на  $\frac{\pi}{2}$ , а величина  $\omega C$  аналогічна про-

відності. Отже, ємнісний опір  $R_c = \frac{1}{\omega C}$  що відповідає

результатам експерименту. Аналогічні підходи можна використати для введення поняття індуктивного опору.

При вивченні резонансу в більшості випадків доводиться відмовитися від побудови математичної моделі процесу і вести виклад на основі демонстраційного експерименту й логічного аналізу його результатів [9, с. 40].

Збирають електричне коло з послідовно з'єднаними котушкою (обмотка 220 В від розбірного трансформатора), батареї конденсаторів на 58 мкФ та реостата. Як індикатор струму використовують малопотужну лампу розжарення на 6,3 В або міліамперметр змінного струму. Як джерело струму використовують шкільний генератор звукової частоти (ГЗШ). Підібравши попередньо параметри установки так, щоб резонанс спостерігався на частоті, яка відповідає середині одного з діапазонів генератора, проводять дослідження цього явища.

З'єднавши вихід звукового генератора з електронним осцилографом, можна спостерігати осцилограму на екрані. Учні переконуються в тому, що амплітуда напруги залишається незмінною, а частота змінюється. Повільно обертаючи ручку регулювання частоти звукового генератора, показують, що в міру зростання частоти прикладеної напруги амплітуда сили струму в колі спочатку зростає й досягає максимуму, а потім зменшується. Це дозволяє якісно побудувати резонансну криву.

За відсутності ГЗШ живлення установки можна здійснювати від мережі через знижувальний трансформатор. Тоді частота й амплітуда зовнішньої напруги залишаються незмінними.

Змінюють власну частоту контуру, змінюючи ємність конденсатора або індуктивність котушки (переміщують осердя, вставлене в котушку) і спостерігають резонанс.

Аналізують результати експерименту. Оскільки у даному колі послідовно ввімкнена котушка індуктивності опором

$R_c = \omega L$  і конденсатор, опір якого  $R_c = \frac{1}{\omega C}$ , ці опори по-

різному залежать від частоти. Індуктивний опір збільшується зі збільшенням частоти, ємнісний – зменшується. Зменшення частоти, навпаки, приводить до зростання ємнісного і зменшення індуктивного опорів. У якийсь момент значення цих опорів стають однаковими. Учні знають, що котушка індуктивності і конденсатор (індуктивний та ємнісний опори) спричиняють зсув по фазі коливань струму: для котушки фаза сили струму зсунута на

$-\frac{\pi}{2}$ , для конденсатора – на  $+\frac{\pi}{2}$ . Це означає, що при однакових

значеннях  $R_L$  і  $R_C$ , їх сумарний опір стає рівним 0 і сила струму в контурі визначається лише його активним опором. Отже,

умовою резонансу є рівність  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ . Отже, резонанс у контурі

наступає, якщо частота прикладеної до нього напруги визначається рівністю:  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ . Умовою резонансу є рівність власної частоти коливань контуру частоті прикладеної до нього зовнішньої напруги.

Резонансна амплітуда сили струму дорівнює  $I_{\max \text{ рез}} = \frac{I_{\max}}{R}$ .

Аналогічно визначається діюче резонансне значення сили струму.

У класах, де не розглядаються поняття індуктивного та ємнісного опорів, формування поняття резонансу в електричних колах (контурах) вводять на основі експерименту та використовуючи аналогію з механічним резонансом: резонанс настає тоді, коли власна частота контура співпадає з частотою прикладеної до нього зовнішньої напруги.



У результаті вивчення явища резонансу учні повинні засвоїти наступне:

1) частота вимушених коливань сили струму дорівнює частоті прикладеної до кола напруги і не залежить від його параметрів;

2) амплітуда вимушених коливань сили струму пропорційна амплітуді прикладеної напруги і залежить від параметрів кола, зокрема від співвідношення між власною частотою кола (контурю) і частотою прикладеної до нього напруги;

3) у випадку, коли частота зовнішньої прикладеної напруги і власна частота контуру однакові, тобто при резонансі, повний опір кола виявляється мінімальним, а амплітуда сили струму стає максимальною;

4) при резонансі коливання сили струму і напруги співпадають за фазою, і  $\cos \varphi_{рез} = 1$  коливальна система споживає максимальну потужність від зовнішнього джерела. Останнє положення з'ясовується лише в класах з поглибленим вивченням фізики.

Вивчаючи питання електроенергетики (генератори змінного струму, трансформатори, електростанції, лінії електропередач), школярі не тільки знайомляться з матеріалом, важливим у плані їх політехнічної освіти, але й повторюють, узагальнюють і поглиблюють ряд важливих положень електродинаміки і теорії коливань. Цей матеріал має велику виховну роль: показується значення електроенергетики в розвитку економіки країни, з'ясовуються екологічні проблеми електроенергетики та ін.

Задача вчителя – показати учням, що темпи прискорення науково-технічного прогресу значною мірою визначаються енергетичним забезпеченням промисловості і сільського господарства. Електроенергія є універсальним видом енергії. Вона має значні переваги в порівнянні з іншими видами енергії – легкість одержання, передачі і використання. Саме тому зростання продуктивності праці значною мірою обумовлене усе більш широким використанням електроенергії. Разом з тим постають проблеми енергозбереження, екології та ін.

## 5. Типові задачі

Формування вмінь застосовувати одержані знання в конкретних випадках здійснюється в процесі розв'язування задач. Зокрема, учні, які вивчають фізику за програмою універсального технологічного природничого профілів повинні вміти: 1) визначити основні характеристики електромагнітних коливань; 2) розраховувати параметри системи, в якій можуть відбуватися електромагнітні коливання із певними характеристиками.

Відповідно за змістом навчального матеріалу, який має бути застосований учнями під час розв'язування задач з теми “Електромагнітні коливання” можна виділити такі види задач:

► **На розрахунок амплітуди напруги, сили струму, періоду, частоти, початкової фази та інших характеристик на основі заданих рівняння коливань, параметрів контуру, або за представленими графіками коливальних процесів**

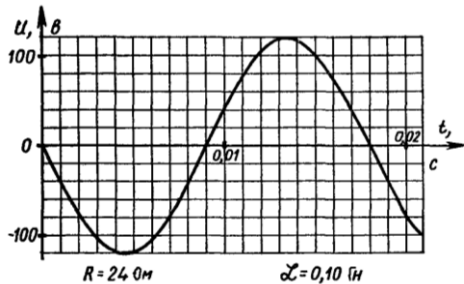
Ємність конденсатора коливального контуру  $0,4 \text{ мкФ}$ , частота власних коливань  $5 \text{ кГц}$ , амплітуда заряду  $8 \text{ мкКл}$ . Написати рівняння  $q = q(t)$ ,  $u = u(t)$  та  $i = i(t)$ . Знайти амплітуду напруги, амплітуду сили струму та індуктивність котушки.

► **На розрахунок параметрів коливального контуру, або визначення величин, що характеризують коливання в коливальному контурі**

Унаслідок збільшення ємності конденсатора коливального контуру на  $0,08 \text{ мкФ}$  частота коливань зменшилася у 3 рази. Визначити початкову ємність конденсатора. Індуктивність котушки лишилася попередньою.

► **На розрахунок величин, що характеризують змінний струм у колах**

За графіком (мал. 59) визначити амплітудне значення змінної ЕРС, її період та частоту. Записати формулу зміни ЕРС з часом. Яке значення напруги через 10, 15 та 20 мс?



Мал. 59

**►► На розрахунок характеристик та елементів простих електричних кіл змінного струму**

Первинна обмотка силового трансформатора для розжарення радіолампи має  $n_1 = 2200$  витків і увімкнена в мережу з напругою  $U_1 = 220 \text{ В}$ . Яку кількість витків  $n_2$  повинна мати вторинна обмотка, якщо її активний опір  $r = 0,5 \text{ Ом}$ , а напруга розжарення лампи  $U_p = 3,5 \text{ В}$  за сили струму розжарення  $I_p = 1 \text{ А}$ ?

**►► На розрахунки характеристик трансформаторів та втрат під час передавання електроенергії на відстань**

Від знижувальної трансформаторної підстанції, діюче значення напруги на виході якої  $220 \text{ В}$ , необхідно протягнути до споживача двопровідну лінію електропередачі завдовжки  $1 \text{ км}$ . Якого перерізу має бути алюмінієвий провід, яким прокладається ця лінія, якщо споживана в навантаженні потужність  $10 \text{ кВт}$ , а діюче значення спаду напруги в лінії не повинно перевищувати  $20 \text{ В}$ ? Навантаження на кінці лінії виключно активне.

## 6. Організація контролю та обліку знань учнів

Система контролю і оцінювання знань з теми повинна охопити вузлові питання: знання і вміння аналізувати процеси, що відбуваються у системах, де відбуваються електромагнітні коливання.

Тому в систему контролю доцільно включити дві-три самостійних роботи, які виконуються по завершенню вивчення вільних коливань, змінного струму та його протікання в електричних колах, та після вивчення трансформаторів і передачі електроенергії на відстань. Оперативно оцінити знання учнями величин і співвідношень між ними, та вмінь застосовувати вивчені закономірні зв'язки між величинами, що характеризують коливання, можна, провівши 2-3 диктанти. Проведення в кінці теми контрольної роботи дозволить за результатами всіх цих видів робіт оцінити навчальні досягнення учнів і атестувати їх.



### Питання для самоконтролю

1. Які основні завдання стоять перед учителем у процесі вивчення теми?
2. Чим визначаються особливості методики вивчення теми “Електромагнітні коливання”?
3. Які основні питання розглядаються в темі “Електромагнітні коливання”, які особливості її структури?
4. Яка послідовність формування понять “електромагнітні коливання”, “коливальний контур”?
5. Які особливості вивчення змінного струму як прикладу вимушених коливань?
6. Які демонстрації передбачені під час вивчення теми?
7. Який зміст основних етапів організації вивчення електромагнітних автоколивань?
8. Які основні види задач, що розв'язуються при вивченні теми?

---

**Лекція 15.**  
**Методика вивчення теми**  
**“ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ”**

**1. Науково-методичний аналіз змісту  
та структури теми**

Зміст теми “Електромагнітні хвилі” охоплює широке коло питань: електромагнітні хвилі та їх властивості, питання радіозв’язку, світлові хвилі та електромагнітні випромінювання різних довжин хвиль. Зміст теми (див. таблицю нижче) дозволяє реалізувати поставлені перед вивченням теми завдання, які за програмою [34] визначено так:

- з’ясувати залежність енергії електромагнітної хвилі від частоти; сформувані в учнів поняття поверхнева густина потоку випромінювання;
- показати практичне застосування модуляції й детектування;
- сформувані в учнів знання про основні напрямки науково-технічного прогресу, пов’язані із застосуванням електромагнітних хвиль;
- сформувані знання про одне з основних положень хвильової теорії – принцип Гюйгенса; на його основі пояснити закон відбивання та заломлення світла. Зміст теми можна відобразити у вигляді структурно-логічної схеми. У темі можна виділити чотири відносно самостійні та логічно завершені частини: електромагнітні хвилі, передача інформації за допомогою електромагнітних хвиль, властивості

- електромагнітних хвиль, електромагнітні випромінювання різних діапазонів. умови повного відбивання й використання цього явища;
- формувати знання про поляризацію світла, розкрити її суть з позиції електромагнітної теорії світла, ознайомити із застосуванням поляроїдів;
  - сформуванати, узагальнити й систематизувати знання про різні види електромагнітного випромінювання, розглянути перехід кількісних змін у якісні, на їх прикладі розвивати мислення учнів;
  - ознайомити учнів з історією винайдення радіо і принципами радіотелефонного зв'язку, сприяти усвідомленню соціально-економічної значущості розвитку засобів зв'язку;
  - вивчаючи світлові явища, ознайомити учнів з різними методами вимірювання швидкості світла, дати поняття про закони заломлення і відбивання, переконати учнів у пізнаванності світу і безмежності пізнання; формуючи поняття про дисперсію, дифракцію та інтерференцію світла, розвивати вміння спостерігати явища природи і давати їм наукове тлумачення; показати застосування вивчених явищ у різних галузях науки, техніки, народного господарства.

У процесі вивчення електромагнітних хвиль відкривається можливість розкрити прогностичну роль теорії, здатність передбачати явища, невідомі до її створення. Це стосується насамперед узагальнення Максвеллом властивостей змінного електромагнітного поля у вигляді системи рівнянь для векторів електромагнітного поля й теоретичне передбачення існування електромагнітних хвиль з визначеними властивостями.

Зміст теми можна відобразити у вигляді структурно-логічної схеми.



У темі можна виділити чотири відносно самостійні та логічно завершені частини: електромагнітні хвилі, передача інформації за допомогою електромагнітних хвиль, властивості електромагнітних хвиль, електромагнітні випромінювання різних діапазонів. Розгляд дослідів Герца дозволяє показати роль експерименту як критерію істинності теорії. На прикладі діяльності О.С. Попова та Г. Марконі й наступного розвитку радіотехніки (радіомовлення, космічний зв'язок, радіолокація, телебачення) з'ясовується роль науки в науково-технічному і соціальному прогресі. Усе це дає можливість з'ясувати питання пізнаванності природи, роль у цьому процесі теорії та експерименту, розкрити роль видатних закордонних і вітчизняних вчених у науково-технічному прогресі.

Велике й політехнічне значення цієї теми, оскільки матеріал, що в ній вивчається є теоретичною основою розвитку радіо-

техніки, сучасних телекомунікаційних засобів, оптичних приладів.

Використовувати рівняння Максвелла для з'ясування положень електромагнітної теорії через їх складність у середній школі неможливо. Не можна застосувати моделі, як це робилося під час вивчення механічних хвиль. Вихід з цих утруднень може бути знайдений у детальному якісному аналізі основ теорії Максвелла, а також у широкому застосуванні демонстраційного експерименту з метою підтвердження справедливості висновків, отриманих шляхом теоретичного аналізу.

## 2. Основні поняття теми та їх науково-методичний аналіз

До початку вивчення електромагнітних хвиль учні вже мають уявлення про механічні хвилі, як поширення коливань у пружному середовищі. Знайомі вони і з основними поняттями, що характеризують механічні хвилі: амплітуда, довжина хвилі і її зв'язок із швидкістю поширення хвилі й періодом (частотою). Ці поняття, сформовані під час вивчення механічних хвиль, можуть служити основою для з'ясування аналогічних понять, які характеризують електромагнітні хвилі.

**Електромагнітна хвиля** – це змінне електромагнітне поле, яке поширюється в просторі. Електромагнітна хвиля поширюється зі швидкістю світла. Електромагнітну хвилю як поширення одночасних взаємозумовлених змінних електричного і магнітного полів – складових електромагнітного поля – можна аналітично описати двома рівняннями, що описують коливання векторів напруженості електричного та індукції магнітного полів:

$$B = B_0 \sin \omega \left( t - \frac{r}{c} \right); \quad E = E_0 \sin \omega \left( t - \frac{r}{c} \right).$$



Оскільки вектори  $\vec{E}$  і  $\vec{B}$  змінюються синфазно, то енергія електромагнітної хвилі  $W = W_e + W_m = 2W_e = 2W_m$ . Для учнів старшої школи цілком доступне з'ясування поняття енергії електромагнітної хвилі та її залежності від частоти [6, с. 126-130].

**Потік випромінювання** являє собою середню потужність випромінювання за час, значно більший від періоду коливань хвилі. Він характеризує повну енергію, перенесену електромагнітною хвилею через яку-небудь поверхню за одиницю часу.

**Поверхнева густина потоку випромінювання** дорівнює середньому значенню енергії, перенесеної електромагнітною хвилею через одиницю площі за одиницю часу.

**Швидкість електромагнітних хвиль** у вакуумі не залежить від швидкості руху джерела чи приймача, тобто інваріантна щодо системи відліку.

Разом із тим швидкість поширення електромагнітних хвиль у речовині теж залежить від властивостей речовини. Залежність показника заломлення від довжини хвилі називають *дисперсією*. Наслідком дисперсії є розкладання білого світла в *спектр*.

**Модуляція** – зміна параметрів електромагнітної хвилі за певним законом, у якому закодована інформація. Повільна порівняно з періодом коливань зміна амплітуди, частоти чи фази коливань за певним законом [33, с. 428].

**Демодуляція (детектування)** – виділення низькочастотного модулюючого коливання з модульованого високочастотного коливання.

### 3. Навчальний фізичний експеримент

#### Демонстрації

Випромінювання й приймання електромагнітних хвиль [10, с. 131; 25, с. 145]. Відбивання електромагнітних хвиль [10, с. 143]. Заломлення електромагнітних хвиль [25, с. 151]. Інтерференція й дифракція електромагнітних хвиль. [25, с. 151]. Поляризація електромагнітних хвиль [36, с. 75]. Модуляція і детектування високочастотних електромагнітних коливань [10,

с. 143; **25**, с. 151; **36**, с. 75]. Поширення хвиль на межі двох середовищ: відбивання та заломлення світла, повне відбивання; світловод [10, с. 158; **36**, с. 86]. Утворення інтерференційних смуг [10, с. 188; **36**, с. 103]. Дифракція світла від тонкої нитки та дифракція світла від вузької щілини [10, с. 198; **36**, с. 119]. Розкладання світла в спектр за допомогою дифракційних решіток та призм [10, с. 185; **36**, с. 122]. Поляризація світла поляроїдами та застосування поляроїдів для вивчення механічних напруг у деталях конструкцій [10, с. 207; **35**, с. 126]. Властивості інфрачервоного та ультрафіолетового випромінювання [10, с. 224].

### **Фронтальні лабораторні роботи**

“Визначення показника заломлення скла”, “Спостереження інтерференції та дифракції світла”, “Вимірювання довжини світлової хвилі за допомогою дифракційної ґратки”.

У класах з поглибленим вивченням фізики пропонується додатково виконати лабораторні роботи: “Визначення головної фокусної відстані та оптичної сили збиральної лінзи” та “Визначення роздільної здатності ока”.

### **4. Методика вивчення основних питань теми**

Вивчення електромагнітних хвиль доцільно почати з повторення питань щодо взаємозв'язку електричних і магнітних полів, які вже розглядалися в попередніх класах. Звертають увагу на те, що:

- заряджені тіла мають електричне поле. Якщо вони нерухомі в даній системі відліку, то їх поле залишається незмінним у часі.
- рух заряджених частинок у системі відліку, у якій їх середня упорядкована швидкість стала, пов'язаний з магнітним полем.
- змінне магнітне поле завжди пов'язане з вихровим електричним полем, модуль вектора напруженості якого може

бути сталим або змінним у часі в залежності від того як змінюється магнітне поле – рівномірно чи нерівномірно.

- оскільки у випадку, коли заряджені тіла чи частинки нерухомі (рухаються рівномірно), напруженість електричного й індукція магнітного полів у часі не змінюються, електромагнітна хвиля виникнути не може.

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок: поширення електромагнітного поля у просторі можливе за наявності змінних у часі електричних і магнітних полів.

Щоб розглянути процес утворення електромагнітної хвилі на якісному рівні, не звертаючись до рівнянь Максвелла, пригадують явище електромагнітної індукції і з'ясовують, що відповідно до ідей Максвелла у загальному випадку явище електромагнітної індукції зводиться до того, що змінне магнітне поле нерозривно пов'язане з вихровим електричним полем. Потім розповідають про узагальнення, зроблене Максвеллом: магнітне поле може породжуватися не тільки рухомими електричними зарядами (струмами провідності), але й змінними в часі електричними полями (струмами зміщення).

Слід зазначити, що до середини XIX ст. був накопичений великий емпіричний матеріал: досліди й концепція Фарадея, закони Кулона, Ампера. Найбільшою заслугою Максвелла є теоретичне узагальнення цього матеріалу. Теорія Максвелла показує: *електричні поля пов'язані або з електричними зарядами, або з магнітними полями, що змінюються в часі.* Збурення електромагнітного поля, що виникло, поширюється в просторі від однієї точки до іншої у вигляді електромагнітної хвилі зі скінченною швидкістю, яка дорівнює швидкості світла.

Як матеріальний об'єкт, електромагнітне поле у вакуумі може бути охарактеризоване двома величинами – напруженістю електричного поля й індукцією магнітного поля. Особливий акцент потрібно зробити на матеріальність електромагнітного поля. Підтвердження цього може бути здійснене при вивченні радіозв'язку, телебачення і радіолокації.

Пояснюючи цей матеріал необхідно зупинитися на питанні про принцип відносності в електромагнетизмі: *будь-який електричний заряд створює електричний струм у тій системі відліку, відносно якої він рухається чи яка рухається відносно нього*. У системі відліку, у якій його швидкість дорівнює нулю, магнітне поле не виявляється. Тому магнітне поле і його характеристики відносні. Крім магнітного поля навколо рухомого заряду існує електричне поле, напруженість якого також залежить від вибору системи відліку. Те ж саме можна сказати про поле постійного магніту чи витка зі струмом. Тільки у випадку, коли носії заряду рухаються з прискоренням, виникає електромагнітна хвиля, яка описується двома векторами поля в усіх системах відліку.

У процесі з'ясування механізму випромінювання електромагнітних хвиль учні засвоюють найважливіше положення: *можливість існування змінного електромагнітного поля незалежно від зарядів і струмів за рахунок взаємопов'язаної зміни в часі електричних і магнітних полів*.

При розгляді процесу поширення електромагнітних хвиль важливо, щоб учні засвоїли наступні положення:

- навколо джерела електромагнітних хвиль відбувається періодична зміна характеристик електричних і магнітних полів (векторів напруженості й індукції);
- амплітуди коливань енергії електричних і магнітних полів у кожній точці однакові, а коливання векторів  $\vec{E}$  і  $\vec{B}$  збігаються за фазою;
- напрямки коливань векторів  $\vec{E}$  і  $\vec{B}$  взаємно перпендикулярні, а також перпендикулярні напрямку поширення хвилі, що дозволяє зробити висновок про поперечність електромагнітних хвиль;
- електромагнітні хвилі можуть поширюватися як у вакуумі, так і в речовині;

- швидкість електромагнітних хвиль у вакуумі дорівнює

$$300000 \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$

З'ясовуючи такі характеристики електромагнітних хвиль як довжина, період, частота варто повернутися до визначення поняття довжини хвилі, яке було введено для механічних хвиль. Визначивши довжину хвилі як відстань між двома найближчими точками, які коливаються в однаковій фазі, підводять учнів до висновку, що відстань між ними відповідає зміні фази хвилі на  $2\pi$  чи зміні часу коливання на період  $T$ . Звідси випливає, що довжина хвилі може бути визначена так:  $\lambda = cT$ , або  $\lambda = \frac{c}{\nu}$ .

Учнів необхідно познайомити з історією виявлення електромагнітних хвиль в експерименті, розповівши про досліди Г. Герца (1887-1891 рр.) з генерації, прийому й дослідження властивостей електромагнітних хвиль. Повідомлення про роботи Г. Герца можуть зробити учні, які побажають самостійно опрацювати цей матеріал.

З'ясування властивостей електромагнітних хвиль здійснюється на основі демонстраційних дослідів з генератором сантиметрових хвиль. При цьому необхідно врахувати, що за діючою програмою дифракція, інтерференція, поляризація, властиві хвильовому руху, детальніше розглядаються на прикладі електромагнітних хвиль і, зокрема, хвиль оптичного діапазону.

Політехнічна спрямованість теми особливо проявляється під час ознайомлення учнів з принципами радіопередачі і радіоприйому. На уроках фізики повинні бути розглянуті лише фізичні принципи будови і дії радіотехнічних пристроїв, які забезпечують радіомовлення, телебачення і радіолокацію.

Щоб учні краще зрозуміли роботу радіопередавача і радіоприймача, слід проаналізувати їхні блок-схеми, визначити функціональне призначення окремих частин блок-схеми радіомовлення.

Програма не передбачає теоретичного аналізу процесу перетворення сигналів на всіх етапах проходження по радіомов-

ному тракту, – це виходить за рамки можливостей загальноосвітнього курсу. Тому основу викладу складає навчальний експеримент – демонстрації на уроці й вивчення радіоприймача під час проведення лабораторного практикуму.

Як відомо, у радіотехніці застосовується кілька видів модуляції: амплітудна, частотна, фазова й інші.

Найбільш простою для пояснення і демонстрації є *амплітудна модуляція*. Її і варто розглянути, хоча на практиці все ширше застосовується частотна модуляція. Пояснюють принцип амплітудної модуляції, використовуючи відповідні схеми і малюнки. При зміні амплітуди модулюючого сигналу змінюється глибина модуляції. Паралельно з розповіддю демонструють модуляцію коливань за допомогою осцилографа [25, с. 153].

При розгляді схеми найпростішого радіоприймача важливо пояснити, що такий приймач має недолік: при великих радіочастотах (коротких хвилях) не можна одержати значне посилення сигналу. Тому такі приймачі можуть приймати тільки близькі радіостанції, що працюють на довгих та середніх хвилях. На прикладі простого детекторного приймача розглядається і процес демодуляції.

Вивчення питань, пов'язаних з телебаченням, доцільно перенести в тему “Кванти світла. Дії світла”, оскільки принцип телебачення базується на двох ефектах: фотоэффект і радіохвилі. Принцип передачі зображення на відстань принципово не відрізняється від передачі інших видів інформації. А перетворення оптичного зображення в електричні сигнали базується на явищі фотоэффекту. Тому телебачення можна назвати лише як приклад передачі певного виду інформації.

До вивчення оптичних явищ можливі різні підходи. Відповідно до структури традиційної програми матеріал вивчається в історичній послідовності. Спочатку викладається геометрична оптика, потім основи хвильової теорії світла, далі вводиться поняття про його електромагнітну природу, а потім розглядаються квантові властивості світла.

Сучасна методика передбачає вивчення матеріалу не в історичній послідовності, а відповідно до паралельно-єдиного

підходу, коли учнів відразу вводять у коло сучасних уявлень про те, що світло – це електромагнітна хвиля. При такому підході прогноуються явища, з’ясовуються умови їх спостереження, що і перевіряється засобами навчального експерименту. Такий підхід більш ефективний як з наукової, так і з методичної точки зору, відкриває великі можливості для створення проблемних ситуацій і їхнього розв’язання на основі теоретичних міркувань та подальшої перевірки за допомогою навчального експерименту.

Після вивчення основних ідей теорії Максвелла й ознайомлення з методами випромінювання і прийому радіохвиль учнів знайомлять з дослідами з визначення швидкості світла. Співставлення результатів дослідів з визначення швидкості світла та висновків з теорії Максвелла дозволяють говорити про те, що світло є теж електромагнітною хвилею. Далі розглядаються властивості електромагнітних хвиль і світлові явища, які можна пояснити хвильовою природою світла: відбивання і заломлення електромагнітних хвиль (у тому числі світлових) на межі поділу двох різних середовищ, їх інтерференція, дифракція, дисперсія, поляризація.

Вивчення явищ відбивання і заломлення електромагнітних хвиль може бути організоване на основі дедуктивного підходу.

1. Спираючись на досліди Г. Герца та принцип Гюйгенса теоретично з’ясовують особливості поведінки хвиль на межі поділу двох середовищ. Звертають увагу учнів на те, що взаємодіючи з речовиною електромагнітна хвиля спричинює коливання заряджених частинок, які входять до складу кожної речовини. Ці частинки стають джерелами нових сферичних хвиль.
2. Використавши принцип Гюйгенса, розглядають явища поширення хвилі після відбивання та заломлення.

Враховуючи, що швидкість поширення падаючої та відбитої хвилі в одному й тому ж середовищі однакові, скориставшись геометричною побудовою [18, с. 138], показують, що в разі відбивання електромагнітної хвилі на межі двох середовищ кут її відбивання дорівнює куту падіння.

З'ясовуючи причини заломлення електромагнітних хвиль, звертають увагу на те, що швидкість хвилі в різних середовищах може бути різною. Аналізуючи за допомогою геометричної побудови поширення хвилі після падіння на межу двох різних середовищ приходять до висновку, що на межі двох середовищ відбувається її заломлення і показують, що  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$ . На основі

цього співвідношення вводять поняття відносного  $n_{2,1} = \frac{v_1}{v_2}$  і

абсолютного  $n = \frac{c}{v}$  показників заломлення та формулюють закон заломлення електромагнітних хвиль.

3. За допомогою демонстраційного експерименту проводять перевірку встановлених законів для випадку світлових хвиль та хвиль радіодіапазону.
4. Розглядають прояви й застосування в техніці відбивання (дзеркала, радіолокація) та заломлення електромагнітних хвиль (плоско-паралельна пластинка, призма, лінзи).
5. Застосовуючи закон заломлення світла до випадку поширення світла на межі двох середовищ з оптично більш густого у менш густе, з'ясовують явище повного внутрішнього відбивання та його застосування в оптоволоконній техніці.

Геометрична оптика розглядається як граничний випадок хвильової оптики і використовується при з'ясуванні принципів дії найпростіших оптичних приладів: плоско-паралельної пластинки, призми, лінз на основі поняття світлового променя та відповідних законів відбивання та заломлення світла.

Паралельно-єдиний підхід застосовується й під час вивчення явищ інтерференції, дифракції, дисперсії та поляризації електромагнітних хвиль.



Розглядаючи інтерференцію електромагнітних хвиль спочатку з'ясовують, що до електромагнітних хвиль, які є змінним електромагнітним полем, може застосовуватися принцип суперпозиції. Поширюючись у просторі, електромагнітні хвилі, наприклад світлові, не впливають одна на одну. Про це свідчать результати спостереження перетину двох світлових пучків. Проте, за певних умов, у результаті накладання хвиль може виникати стійка в часі картина посилення й послаблення результуючих світлових коливань у різних точках простору. У цьому можна переконати учнів, проаналізувавши дію біпризми Френеля та провівши відповідні досліди [10, с. 188]. Після цього вводять поняття когерентних хвиль та з'ясовують умови максимумів і мінімумів:  $\Delta l = 2k \frac{\lambda}{2}$  та  $\Delta l = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ . Далі розглядають прояви цього явища в природі та його застосування.

Одним з вагомих доказів хвильової природи світла є явище дифракції – заходження світла в геометричну тінь. Причину дифракції пояснюють на основі принципу Гюйгенса. Важлива роль у вивченні явища дифракції належить демонстраційному експерименту. Використання лазера дозволяє одержати чіткі картини явища дифракції на щілині, тонкій нитці, спостерігати пляму Пуассона.

Суттєва увага при дифракції світла приділяється будові й дії дифракційної ґратки. Розглянувши хід променів у дифракційній ґратці та врахувавши умови інтерференційних максимумів, одержують формулу дифракційної ґратки:

$$d \sin \varphi = k \lambda.$$

Дисперсія світла є наслідком того, що швидкість поширення електромагнітної хвилі в середовищі залежить не тільки від властивостей цього середовища, а й від довжини самої хвилі. Відповідно, абсолютний показник заломлення, наприклад, для світлових хвиль різної довжини – різний. Вивчення явища дисперсії можна здійснювати по різному: *на основі історичного підходу, або поклавши в основу ознайомлення з явищем дисперсії*

*демонстраційний експеримент.* За наслідками експерименту можна зробити висновок про залежність показника заломлення від довжини світлової хвилі.

Розглядаючи поляризацію електромагнітних хвиль, звертають увагу на те, що поляризацію хвилі можна виявити за допомогою радіоприймача з антеною. Світло – електромагнітна хвиля, проте, у звичайному природному світлі вектори  $\vec{E}$  і  $\vec{B}$  хоч і коливаються перпендикулярно напрямку поширення хвилі у взаємно перпендикулярних площинах, положення цих площин увесь час змінюється. Далі учнів знайомлять із джерелами і методами одержання поляризованого випромінювання та його виявлення за допомогою оптично анізотропних кристалів. Легко можна продемонструвати і поляризованість лазерного променя. за допомогою поляроїда. Розмістивши його упоперек променя та повертаючи його в цій площині, спостерігають на екрані зменшення та збільшення інтенсивності світлового пучка.

## 5. Типові задачі

Закріплення вивченого матеріалу та формування вмінь застосовувати одержані в темі знання здійснюють шляхом розв'язування якісних та кількісних задач таких типів:

### ►► На поширення електромагнітних хвиль, визначення їх характеристик

*На якій відстані від антени радіолокатора перебуває об'єкт, якщо відбитий від нього радіосигнал повернувся назад через 200 мкс?*

### ►► На поширення хвиль світлового діапазону на межі поділу середовищ

*Під яким кутом повинен падати промінь на скло, щоб заломлений промінь був перпендикулярний до відбитого?*

►► **На використання закономірностей, які визначають хвильові властивості світла**

*Щоб визначити період дифракційної ґратки, на неї спрямували світловий пучок крізь червоний світлофільтр, який пропускає промені з довжиною хвилі 0,76 мкм. Який період має ґратка, якщо на екрані, віддаленому від неї на 1 м, відстань між спектрами першого порядку дорівнює 15,2 см?*

**6. Організація контролю та обліку знань учнів**

Тема включає значний обсяг матеріалу, який має бути засвоєний на рівні розуміння явищ і особливостей процесів їх особливостей. Це – виникнення і поширення електромагнітних хвиль; одержання хвиль радіодіапазону, їх випромінювання та прийом; хвильові процеси поширення світла (інтерференція, дифракція, дисперсія, поляризація). Рівень засвоєння цього матеріалу доцільно проконтролювати шляхом усного опитування учнів.

Рівень сформованості практичних вмінь і навичок використання одержаних знань для розв'язування задач можна перевірити, провівши самостійні роботи на розв'язування задач після вивчення законів відбивання та заломлення світла, хвильових властивостей світла. Протягом вивчення теми доцільно також провести дві контрольні роботи: 1) після вивчення електромагнітних хвиль радіодіапазону, явищ відбивання і заломлення хвиль та їх законів; 2) після вивчення явищ інтерференції, дифракції, поляризації світлових хвиль.



### **Питання для самоконтролю**

1. Які основні завдання стоять перед вивченням теми “Електромагнітні хвилі”?
2. На які особливості, обумовлені змістом навчального матеріалу теми, повинен звертати увагу вчитель, організовуючи вивчення цієї теми?
3. Які основні структурні частини теми “Електромагнітні хвилі” та послідовність їх вивчення?
4. Який зміст демонстраційного та лабораторного експерименту під час вивчення теми, його роль у формуванні понять?
5. На які основні питання необхідно звернути увагу учнів під час формування поняття електромагнітної хвилі?
6. Які властивості електромагнітних хвиль вивчаються в темі?
7. Які методичні підходи можуть бути використані при вивченні хвильових явищ оптичного діапазону?
8. Які вміння мають бути сформовані при вивченні теми?
9. Які види контролю і оцінювання навчальних досягнень учнів можуть бути застосовані в процесі вивчення теми?

---

## **Розділ IV**

### **КВАНТОВА ФІЗИКА**

#### **Лекція 16.**

#### **МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ ПОЧАТКОВИХ КВАНТОВИХ УЯВЛЕНЬ**

##### **1. Науково-методичний аналіз змісту і структури теми**

Невід'ємною складовою частиною сучасної наукової картини світу є квантово-механічна теорія, побудована на основі положень Макса Планка про квантування енергії.

Гіпотеза, сформульована в 1900 році, виявилася настільки плідною, що за останні сто років втілилася практично в усі галузі сучасної фізики, переважна більшість досягнень фізики

XX століття базуються на її положеннях. З огляду на це не можна вважати достатнім і повним природничий світогляд випускника сучасної середньої школи без розуміння основних положень квантової механіки.

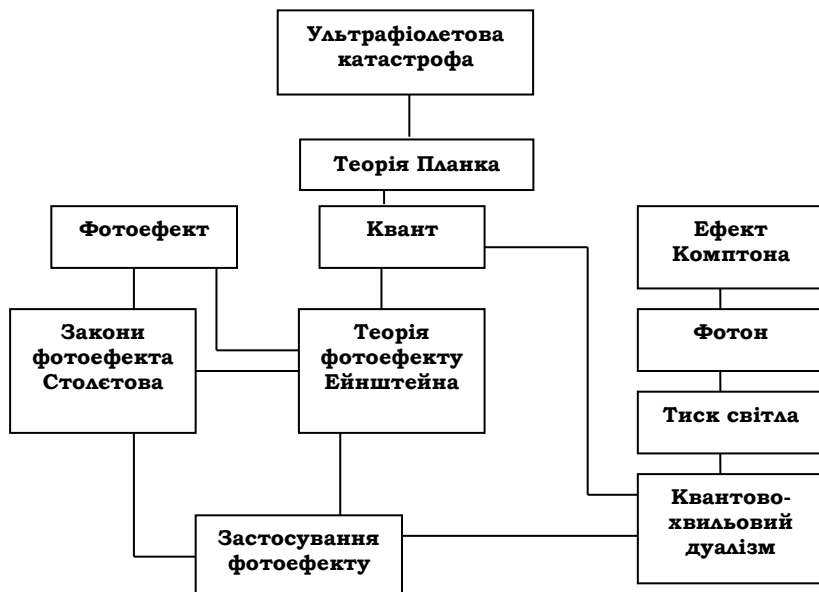
Побудована з врахуванням об'єктивних реалій сьогодення, програма середньої школи передбачає поступове формування в учнів квантово-механічних уявлень упродовж вивчення кількох тем. З них, в першу чергу, потрібно назвати тему “Дії світла. Кванти світла”, при вивченні якої учні отримують початкові уявлення про квантово-механічну теорію та явища, які можна описати на її основі. Структура теми побудована на основі історико-теоретичного підходу та принципу дедукції, коли постульовані положення і факти підтверджуються фізичним експериментом. Так, традиційно актуалізаційною частиною теми є невеликий екскурс в історію подолання кризи в теорії випромінювання абсолютно чорного тіла.

За такого підходу учням спочатку розповідають про кризову ситуацію, яка в фізиці отримала назву ультрафіолетової катастрофи. Проте практика показує, що суть проблеми учням мало зрозуміла через відсутність знань про абсолютно чорне тіло та випромінювальну здатність.

Хоча проблема в цілому незрозуміла учням, проте сам аналіз проблеми служить певним доказом існування об'єктивних підстав для пошуку шляхів розв'язання проблеми, наслідком чого стало створення квантової теорії.

Можливість відтворення явища фотоэффекту в шкільному фізичному кабінеті служить додатковою підставою для твердження про справедливість квантових уявлень. Логічним продовженням формування квантових уявлень є введення поняття фотона, на основі якого пояснюється тиск світла і ефект Комптона. Таким чином, учні підходять до квантово-хвильового дуалізму у взаємодії речовини і електромагнітного поля. Отримані в процесі вивчення теми знання суттєво поглиблюються при вивченні будови атома і фізики атомного ядра, які є квантованими системами, всі процеси в яких відбуваються за законами квантової механіки.

Структурно-логічні зв'язки в темі показані нижче на схемі.



## 2. Основні поняття теми та їх науково-методичний аналіз

До власне квантово-механічних понять належать поняття кванта і фотона.

**Квант** – дискретна частина певного фізичного об'єкта.

**Фотон** – елементарна частинка електромагнітного випромінювання, яка має імпульс та енергію. Маса спокою фотона дорівнює нулю.

Принципово новим для учнів є поняття роботи виходу та червона межа фотоефекту.

*Робота виходу* – це робота, яку потрібно виконати для того, щоб електрон покинув речовину і став вільним.

*Червона межа фотоефекту* – найменша частота випромінювання (найбільша довжина хвилі), при якій ще можливий фотоефект у даній речовині.

### **3. Навчальний фізичний експеримент**

#### **Демонстрації**

Дослід Гальвакса [10, с. 234]. ВАХ фотоелемента [10, с. 238].

### **4. Методика вивчення основних питань теми**

Починаючи вивчати тему, учням потрібно повідомити, що класична електродинаміка, яка базувалася на поняттях і положеннях теорії електромагнітного поля Максвелла не могла пояснити результати експериментальних досліджень випромінювання нагрітих тіл. Класична теорія входила в суперечність з результатами експерименту.

Розв'язуючи проблемну ситуацію, яка складається після такого повідомлення, розповідають, що введення М. Планком в теорію поняття кванта дозволило розв'язати всі труднощі теорії випромінювання. При цьому важливо наголосити на тому, що згідно з положеннями теорії Планка енергія електромагнітного випромінювання має дискретний характер. І найменше значення енергії електромагнітного випромінювання (квант) залежить від частоти:

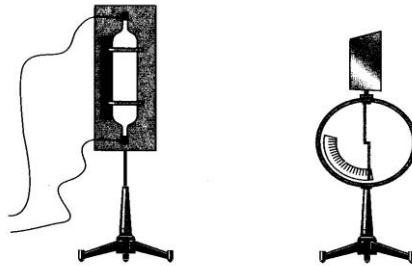
$$E=h\nu.$$

Традиційно склалася така методика, за якою для підтвердження цього висновку в першу чергу розглядається явище фотоефекту. Спочатку розповідають учням, що дослідник електромагнітних хвиль Г. Герц при проведенні дослідів помі-



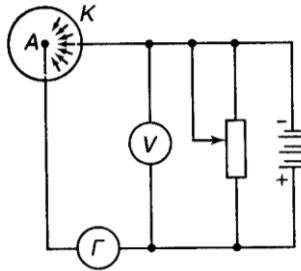
тив, що розряд між двома цинковими кулями відбувався при меншій напрузі, якщо вони освітлювалися ультрафіолетовим випромінюванням. Це стало підставою для проведення Гальваксом дослідів з розряджання негативно зарядженої цинкової пластинки, розміщеної на вістрі електрометра.

Дослід, описаний в [10, с. 234] легко демонструється в умовах фізичного кабінету при наявності в учителя належних навичок демонстрування дослідів з електростатики (мал. 60).



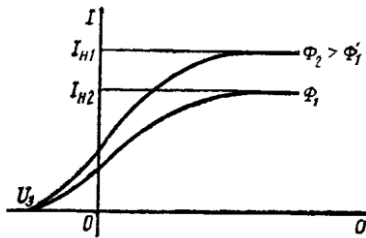
Мал. 60

Аналізуючи дослід, необхідно звернути увагу, що процес розряджання спостерігається лише у тому випадку, коли цинкова пластинка заряджена негативно і освітлюється ультрафіолетовим світлом. Аналіз вказаних особливостей досліду дозволяє зробити висновок, що під дією ультрафіолетового випромінювання з пластинки вилітають негативно заряджені частинки, якими в металі є електрони, і тому зменшується саме негативний заряд. Варто пам'ятати, що електрони будуть вилітати і з незарядженої пластинки, але під дією позитивного заряду пластинки вони відразу повертатимуться назад. Показово, що ефект настає відразу після опромінення. Відсутність фотоefекту у випадку з мідною пластинкою свідчить про роль речовини в процесі.



Мал. 61

Суть дослідження Столетова пояснюється на основі досліджень з вакуумним фотоелементом (мал. 61).



Мал. 62

Результати демонстрації є основою для побудови ВАХ фотоелемента (мал. 62). Для кращого розуміння її змісту учнями, потрібно організувати повторення матеріалу про особливості ВАХ двоелектродної лампи. Залучення отриманих раніше знань дозволить зробити висновки, що з катода під дією світла вириваються електрони, які мають певну кінетичну енергію. Підтвердженням вилітання електронів є наявність струму насичення. Різні значення струму насичення показують, що кількість фотоелектронів залежить від світлового потоку.

Недоліком описаної вище демонстрації є те, що неможливо показати залежність фотоелемента від частоти випромінювання.

Тому ці відомості можна залучати або з дослідів Гальвакса, або з дослідів Столетова, в яких використовувалися кварцове віконечко в скляній посудині, яке пропускало лише ультрафіолетове випромінювання.

Висновки з проведених досліджень узагальнюються у формі трьох законів фотоелектру Столетова.

1. Енергія фотоелектронів не залежить від інтенсивності світлового потоку, а залежить від частоти випромінювання.

2. Кількість фотоелектронів, які вилітають з катода за одиницю часу, залежить від інтенсивності світлового потоку, але не залежить від довжини хвилі.

3. Для кожного металу існує червона межа фотоелектру – частота, нижче якої фотоелектр не відбувається.

У багатьох посібниках формулюють і четвертий закон, згідно з яким явище фотоелектру практично безінерційне. Але цей висновок не очевидний з результатів дослідів, тому його зміст доцільно повідомити як беззаперечний висновок з складних наукових досліджень явища фотоелектру.

Важливе місце в процесі вивчення теми займає вивчення рівняння Ейнштейна. Організуючи його аналіз, потрібно встановити, що воно є записом закону збереження енергії у фотоелекті засобами квантової механіки. Несуперечливість цього рівняння з законами Столетова, які були отримані експериментально, доводиться шляхом співставлення рівняння з цими законами.

Так, перший закон виражається рівнянням

$$\frac{mv_m^2}{2} = h\nu - A.$$

Другий закон пояснюється тим, що кожному фотону відповідає електрон певної енергії. Тому  $N_\phi = N_e$ .

Для третього закону  $\frac{mv_m^2}{2} > 0$ , якщо  $h\nu - A > 0$  або  $h\nu > A$ .

На жаль, учні не володіють поняттям світлового потоку, а тому для спрощення його доводиться користуватися поняттям *інтенсивності* випромінювання, що зрозуміліше учням.

Поняття фотона вводиться як віртуальна частинка. Уявлення про те, що електромагнітне випромінювання поглинається певними порціями – квантами – дозволяє прийти до висновку, що електромагнітну хвилю можна розглядати як потік частинок, енергія яких визначається частотою хвилі. Якщо виходити з принципу еквівалентності маси та енергії, то  $E = m_0 c^2$ , де  $m_0$  – маса віртуальної частинки.

Звідси  $m_0 = \frac{E}{c^2}$ . Якщо врахувати, що енергія кванта

$$E = h\nu, \text{ то } m_0 = \frac{h\nu}{c^2}.$$

Звідси випливає, що електромагнітну хвилю можна уявити як потік частинок з квантованою енергією. Цю частинку називають *фотоном*.

Для кращого розуміння учнями суті ефекту Комптона, доцільно в плані повторення розв'язати задачу на нецентральному удар двох пружних куль. Лише після цього потрібно розповісти учням зміст досліду. При опроміненні важких металів рентгеновським випромінюванням спостерігається вихід вільних електронів і поява випромінювання з більшою довжиною хвилі. Пояснення такого явища з використанням елементів косоного удару двох куль дозволяє створити в учнів уявлення про фотон як про пружну кульку-частинку.

Ще переконливішим прикладом, що підтверджує теорію фотонів, є тиск світла. Існування такого природного явища пояснюється на прикладі відхилення хвостів комет та дослідів Лебедева. Важливе пізнавальне значення має повідомлення учням про те, що світловий тиск пояснюється як на основі фотонної теорії, так і на основі класичної теорії електромагнітного поля, свідчить про корпускулярний дуалізм електромагнітного випромінювання. Це буде служити учням підтвердженням взаємного доповнення однієї теорії другою.

Розглядаючи практичне застосування фотоефекту, як правило, розглядають застосування вакуумних фотоелементів. Але оскільки в сучасній техніці вони практично не застосовуються, то їх приклади замінюють напівпровідниковими фотоелементами.

Поглиблення квантових уявлень учнів відбувається при вивченні будови атома.

## 5. Типові задачі

### ►► *На розрахунок енергії фотона і кванта*

*Яка енергія фотона з частотою коливань  $1 \cdot 10^{15}$  Гц?*

### ►► *На розрахунок роботи виходу електрона з металу*

*Знайти роботу виходу електрона з металу, якщо фотоефект починається при довжині хвилі 600 нм.*

### ►► *На розрахунок швидкості фотоелектронів*

*Робота виходу електрона з цинку дорівнює 4 еВ. Яка швидкість електронів, які вилітають з поверхні цинка при освітленні її випромінюванням з довжиною хвилі 200 нм?*

### ►► *На розрахунок червоної межі фотоефекту*

*Визначити червону межу фотоефекту для калія, робота виходу для якого дорівнює 2 еВ.*

## 6. Організація контролю і обліку знань учнів

У процесі вивчення теми доцільно провести фізичний диктант, самостійну роботу, та контрольну роботу. Фізичний диктант дасть можливість перевірити знання учнями основних понять, які вивчаються в темі та формулювання законів фотоефекту. При виконанні самостійної роботи учні отримають належні навички розв'язування розрахункових і якісних задач. Зміст контрольної роботи повинен забезпечити можливість об'єктивної перевірки рівня теоретичних знань учнів та їх практичних навичок. Це забезпечується підбором задач такого типу, як наведені вище.



### **Питання для самоконтролю**

1. Яке місце теми в програмі?
2. Який зміст теми?
3. Яка роль навчального фізичного експерименту в процесі формування квантових уявлень?
4. Як пов'язані закони фотоефекту з рівнянням Ейнштейна?
5. Які явища підтверджують корпускулярно-хвильовий дуалізм?
6. Чи тотожні поняття кванта і фотона?

---

## Лекція 17.

### МЕТОДИКА ВИВЧЕННЯ БУДОВИ АТОМА

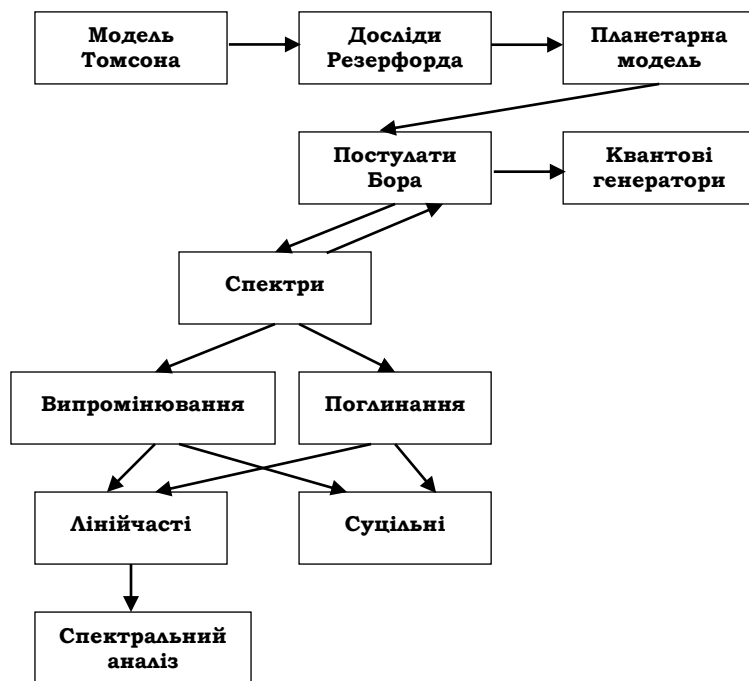
#### 1. Науково-методичний аналіз змісту і структури теми

Одним із завершальних етапів формування в учнів уявлень про сучасну наукову картину світу на уроках фізики в старшій школі є вивчення розділу “Будова атома”. За своїм змістом і структурою розділ відображає розвиток вчення про будову речовини, коли уявлення молекулярно-кінетичної теорії про будову речовини доповнюються положеннями класичної електронної теорії та елементами квантової фізики, засвоєних учнями при вивченні попереднього програмового матеріалу. Вивчення розділу сприяє формуванню наукового світогляду учнів та вміння пояснювати явища природи на основі досягнень сучасної природничої науки. При вивченні розділу формуються знання учнів про фізичні основи сучасних технологій, основаних на використанні процесів на атомному рівні.

Програмою передбачено узагальнення раніше отриманих знань на основі досліду Резерфорда з розсіювання  $\alpha$ -частинок на речовині, які стали експериментальною базою для побудови планетарної моделі будови атома. Детальний розгляд переваг такої моделі і її недоліків здійснюється при вивченні постулатів Бора, явищ поглинання і випромінювання світла атомом, та природи лінійчастих і неперервних спектрів, спектрів поглинання і випромінювання, застосування спектрального аналізу. Важливим моментом у вивченні теми є розгляд будови і принципу дії квантових генераторів – лазерів.

Генеральною лінією теми є квантово-механічне вчення Резерфорда-Бора. Навколо неї розміщені всі питання вчення про

будову атома, передбачені до вивчення програмою. Зв'язки між окремими частинами теми показано на структурно-логічній схемі.



## 2. Основні поняття і їх науково-методичний аналіз

До основних понять теми належать такі: атом, атомне ядро, електронна оболонка, енергетичний рівень, спектр.

*Атом* – це частинка простої речовини, яка є носієм хімічних властивостей хімічного елемента. Відомо стільки видів атомів, скільки є простих хімічних елементів. Атом є структурною одиницею в молекулах складних речовин. Він складається з



центрального позитивно зарядженого ядра та електронів, які утворюють електронну оболонку.

**Атомне ядро** – центральна частина атома; в ньому зосереджена значна частина маси атома; складається з нейтронів і протонів; кількість протонів визначає місце елемента в періодичній таблиці елементів.

**Електронна оболонка** – сукупність електронів, які входять до складу даного атома. Кількість електронів у оболонці визначається значенням позитивного заряду ядра і дорівнює кількості протонів у ядрі. Електронна оболонка має внутрішню структуру, в якій електрони розміщені у відповідності з принципом дозволених енергій на певних енергетичних рівнях, перехід між якими можливий лише при поглинанні чи випромінюванні енергії.

**Енергетичний рівень** – значення енергії електрона в атомі, може мати лише дискретні значення, які визначаються у відповідності з постулатами Бора.

**Спектр** – частотна характеристика коливальних процесів або набору значень параметра певного класу об'єктів. Частотні спектри можуть бути лінійчастими, смугастими, суцільними, комбінованими. Лінійчасті спектри характеризують електромагнітне випромінювання речовини в газоподібному стані. Випромінювання молекул має смугасті спектри. Суцільні та комбіновані спектри характерні для твердого стану речовини.

### 3. Навчальний фізичний експеримент

Можливості демонстраційного експерименту обмежені через складність обладнання для спостереження. Важливою демонстрацією при вивченні будови атома є демонстрація спектрів випромінювання і поглинання [10, с. 217]. Основною частиною установки для цієї демонстрації є спектрометр, за допомогою якого випромінювання від газонаповнених трубок розкладається у спектр. Для ілюстрації досліду Резерфорда використовується модель, яка може мати декілька модифікацій [10, с.255]. Найпростіша демонстрація передбачає використання електростатич-

ної взаємодії між двома зарядженими кульками, одна з яких рухається. Можливе комп'ютерне моделювання досліду Резерфорда.

Дискретність енергетичних рівнів у атомі підтверджується демонстрацією вольт-амперної характеристики тиратрона [10, с. 257]. Можливе використання навіть люмінесцентних ламп денного світла. Дослідження вольт-амперної характеристики такої лампи за допомогою осцилографа з використанням для живлення лампи змінного струму дозволяє отримати характерні “провали” в характеристиці.

#### **4. Методика вивчення основних питань теми**

Будуючи систему вивчення програмового матеріалу про будову атома потрібно враховувати два важливих моменти:

**А.** Будову атома учні вивчали в базовому курсі фізики.

**Б.** З будовою атома учні знайомі з уроків хімії, де учні досить ґрунтовно познайомилися з основними властивостями атомів і особливостями їх будови. Крім цього потрібно врахувати суттєву роль елементів історизму. Відомо, що ознайомлення учнів з історією фізики дозволяє суттєво підвищити рівень проблемності вивчення того чи іншого матеріалу. У даному випадку повідомлення, що відкриття електрона на початку ХХ століття поставило перед ученими проблему з'ясування, у яку структурну одиницю речовини входить електрон, дозволить показати наукову доцільність вивчення будови атома як об'єкта, в склад якого входять електрони. Суть цього повідомлення полягає в тому, що як розв'язання проблеми англійський фізик Д.Д. Томсон запропонував модель атома, за якою атом є суцільною позитивно зарядженою кулею, в якій знаходяться вкраплені електрони. Отже, атом уявлявся суцільним, а звідси висновок, що він повинен бути непроникним для інших мікрочастинок. Таке повідомлення служитиме основою для пояснення проблематики дослідів Резерфорда, у яких здійснювалося бомбардування речовини позитивно зарядженими частинками. Тут потрібно пам'ятати, що вибір Резерфордом  $\alpha$ -частинки не мало

принципового значення. Важливо було, що вона мала значну енергію і позитивний заряд. Опис результатів дослідження послужить підставою для формулювання висновку про те, що атом не може бути суцільним, оскільки частинки проходять через фольгу: у ньому є вільний від частинок простір. Відхилення частинок від прямолінійного поширення свідчило, що, пролітаючи через атом, частинки взаємодіють з позитивно зарядженими частинками, які входять до складу атома. Розсіювання частинок віялом, а тим більше повертання деяких частинок у зворотному напрямі, свідчило, що об'єкти, з якими взаємодіють частинки, мають велику масу. Отримані результати вписувалися в планетарну модель атома, за якою атом має ядро, оточене електронною оболонкою.

Важливим моментом у процесі вивчення будови атома є з'ясування суперечностей класичної моделі Резерфорда, які проявляються у невідповідності результатів, які дають результати аналізу на основі класичної електродинаміки, даним експерименту. Для цього, в першу чергу, потрібно провести з учнями повторення матеріалу про умови випромінювання електромагнітних хвиль зарядженими тілами відповідно до уявлень класичної електродинаміки. Згідно з цією теорією електрон, рухаючись орбітою, перебуває у прискореному русі, а тому повинен неперервно випромінювати електромагнітну хвилю, а з нею поступово втрачати і свою енергію. Спектр такого випромінювання повинен бути суцільним.

Класична теорія не могла також пояснити стійкість атома. Радіус орбіти електрона, який випромінює енергію, повинен зменшуватися, внаслідок чого електрон повинен, врешті-решт, упасти на ядро. Реальна ж стабільність речовини суперечить такому висновку, а отже і самій моделі атома.

Як відомо, вихід зі скрутного положення був знайдений Н. Бором. Його постулати дозволили суттєво вдосконалити модель Резерфорда і відкрити нові можливості для розвитку науки про атом. Для формулювання постулатів Бора було дві підстави – створення квантової теорії М. Планком і дослідження спектрів випромінювання газів, зокрема дослідження спектрів випромі-

нювання водню. Вказані дослідження з одного боку дозволили пояснити стабільність атомів водню, з другого – стали підтвердженням справедливості постулатів. Тому в методичному плані ця обставина створює умови для розробки двох методик навчання.

Одна з цих методик передбачає ознайомлення учнів спочатку з різними типами спектрів і виділення з їх переліку лінійчастих спектрів випромінювання для розріджених газів. Ця методика передбачає використання фізичного експерименту, як джерела знань і критерію істини в фізиці. Така методика досить добре розроблена, фізичні кабінети, як правило, мають належне обладнання – газонаповнені трубки, джерела високої напруги та спектрометри. Досліди можуть бути проведені як в демонстраційному вигляді, так і в формі лабораторних робіт. За відсутності необхідного обладнання, можна використати фотографії спектрів, які є в переважній більшості курсів загальної фізики. Аналізуючи ці спектри, потрібно загострити увагу учнів на тому, що в них можна виділити окремі серії ліній, в розміщенні яких є певна закономірність,

Учням цікаво буде дізнатися, що вперше закономірності в спектрах водню помітив і дослідив швейцарський вчитель математики Бальмер. Ним було встановлено, що для однієї з серій (вона пізніше отримала назву серії Бальмера) частоту випромінювання, якій відповідає певна спектральна лінія, можна розра-

хувати за формулою  $\nu = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2} \right)$ .

Не варто вдаватися в деталізацію змісту формули Бальмера. Достатньо вказати, що пізніше для інших серій були встановлені подібні закономірності, які в загальному вигляді виражаються формулою

$$\nu = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right).$$

Отже, всі серії утворюються внаслідок переходу атома з одного стану в інший. Це буде основою для висновку про існування в атомі деяких стаціонарних рівнів. Підтвердженням загальності такого висновку служать спектри поглинання, в яких

лінії поглинання відповідають тим же частотам, що і для ліній у спектрах випромінювання.

Відомі три постулати **Бора**:

- атом може знаходитися в одному з стаціонарних станів, у якому він не випромінює і не поглинає;
- перехід з одного стаціонарного стану в інший можливий лише внаслідок випромінювання або поглинання енергії:

$$h\nu = E_n - E_k;$$

- момент кількості руху електрона в атомі може мати лише певні дискретні значення

$$mvr = n \left( \frac{h}{2\pi} \right).$$

Як правило, програма рекомендує вивчати лише два перших з них. Вони становлять певний інтерес для формування квантових уявлень учнів. Третій же постулат у подальшому навчанні практично не застосовується. Тим більше, що шкільною програмою з фізики для загальноосвітніх класів не передбачене введення поняття моменту кількості руху.

Другий варіант методики вивчення будови атома передбачає дедуктивний підхід, коли постулати Бора вводяться як засіб усунення суперечностей, властивих моделі атома Резерфорда. У цьому варіанті природа спектрів пояснюється на основі постулатів і слугує підтвердженням їх достовірності.

Обидва варіанти цілком прийнятні з огляду на їх дидактичну цінність. Але перший варіант, повторюючи хід процесу становлення теорії атома, має більший потенціал виховного і формуючого характеру, при якому в учнів формуються певні моральні і особистісні якості.

Заключним етапом вивчення теми є ознайомлення учнів з практичним застосуванням спектрального аналізу для вивчення властивостей речовини на атомному рівні. Серед них потрібно назвати контроль кількісного і якісного складу металевих сплавів, кримінологічні та астрофізичні дослідження.

Серед практичних застосувань знань про будову атома важливе місце займає вивчення будови і принципу дії лазерів.

Незважаючи на широке поширення напівпровідникових лазерів, принцип квантових генераторів вивчається на прикладі газового – гелій-неонового – лазера, принцип дії якого легко пояснити на основі постулатів Бора, ввівши поняття рівня “прилипання”. Необхідність створення такого рівня пояснюється необхідністю накопичення електронів, які при масовому переході з рівня прилипання на основний рівень створюють потужний потік фотонів. Для пояснення причин накопичення електронів на рівні прилипання потрібно порівняти час “життя” електронів на звичайних рівнях ( $10^{-8}$  с) з часом життя електронів на рівні прилипання ( $10^{-5}$  с). Другим важливим моментом у поясненні принципу дії лазера є розгляд так званого індукованого випромінювання. Фотон певної частоти, який рухається в речовині, сприяє появі фотона такої ж частоти (енергії). Напрямок його руху співпадає з напрямком руху первинного фотона. Дзеркала, здійснюючи багаторазове відбивання фотонів, сприяють накопиченню енергії фотонів у світловому імпульсі. З огляду на нові тенденції у використанні лазерів виникає проблема розробки у подальшому методики ознайомлення учнів з напівпровідниковими лазерами. Очевидно, що і в такій методиці повинні “працювати” квантові постулати Бора, що сприятиме поглибленню знань учнів про елементи квантової механіки.

## 5. Типові задачі

► *Типовими для теми є задачі на розрахунок частоти випромінювання атома водню з застосуванням постулатів Бора і уявлень квантової механіки.*

*При переході електрона в атомі Гідрогену з одного рівня на другий енергія атома зменшилася на 1,892 еВ. Яка довжина хвилі випромінювання?*

## 6. Організація контролю і обліку знань учнів

Зміст теми досить описовий. Тому для з'ясування рівня засвоєння знань потрібно використати засоби, які дають можливість перевірити знання учнями основних положень теорії та основні поняття і формулювання. До таких засобів належить фізичний диктант.



### Питання для самоконтролю

1. З якою метою вивчається модель атома Томсона?
2. Яке місце знань про спектри випромінювання і поглинання в процесі вивчення постулатів Бора?
3. Як обґрунтувати актуальність дослідів Резерфорда?
4. Як забезпечити міцність знань учнів про суть дослідів Резерфорда?
5. Які прилади потрібні для демонстрації лінійчастих спектрів?
6. Чому принцип дії квантових генераторів вивчається на прикладі газового лазера?
7. Які перспективи удосконалення змісту теми?

---

**Лекція 18.**  
**МЕТОДИКА ВИВЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПОЛОЖЕНЬ**  
**ЯДЕРНОЇ ФІЗИКИ**

**1. Науково-методичний аналіз**  
**змісту і структури теми**

Тема є завершальною в програмі фізики старшої школи. Її вивчення не лише дозволяє суттєво поглибити знання учнів новими, сучасними уявленнями про будову речовини, але і відкрити перспективи подальшого вивчення природи. Незважаючи на сучасний характер змісту теми, учні мають достатній рівень підготовки для сприймання її змісту. Для її засвоєння в учнів є необхідні знання з електродинаміки (електричний заряд, електромагнітне поле), основ спеціальної теорії відносності (еквівалентність маси та енергії) та елементів квантової механіки (енергія кванта і корпускулярно-хвильовий дуалізм). Крім цього, тема має сучасне практичне звучання. У першу чергу це пов'язане з використанням атомної енергії для потреб суспільного виробництва. Актуальність теми підвищується у зв'язку з проблемами, породженими Чорнобильською катастрофою.

Програма передбачає вивчення таких питань: склад ядра, ядерні реакції та їх енергетичний вихід, ланцюгові реакції, ядерні та термоядерні реакції, проблема розвитку ядерної енергетики в Україні, елементарні частинки та їх властивості.

Програма передбачає вивчення таких питань: склад ядра, ядерні реакції та їх енергетичний вихід, ланцюгові реакції, ядерні та термоядерні реакції, проблема розвитку ядерної енергетики в Україні, елементарні частинки та їх властивості.



Структурно-логічна схема теми



## 2. Основні поняття та їх науково-методичний аналіз

Принципово новими поняттями для учнів є поняття нуклона, енергії зв'язку, дефекту маси, радіоактивності, ядерної реакції.

**Нуклоном** називають частинку, яка входить у склад ядра. Такими частинками є **протони й нейтрони**. Початкові уявлення про них учні отримали при вивченні курсу фізики 8 класу. Протон і нейтрон у ядрі перетворюються один в одного з частотою  $10^{23}$  Гц і мають близькі параметрами. Тому їх об'єднують в одну групу під назвою нуклонів. У ядрі нуклони утримуються ядерними силами, які переважають кулонівські сили відштовхування і за природою є обмінними силами, за яких зв'язок між нуклонами здійснюється через обмін нуклонів  $\pi$ -мезонами.

**Дефектом маси** називають різницю між масою всіх нуклонів ядра у вільному стані і масою зв'язаних нуклонів (масою ядра):

$$\Delta m = \sum m_{\text{нук}} - m_{\text{я}}.$$

Енергія, яка виділяється при поділі ядра на нуклони або окремі частини, називається **енергією зв'язку**. Відповідно до висновків спеціальної теорії відносності ця енергія еквівалентна дефекту мас ядра. Тому

$$E_{\text{зв}} = \Delta m \cdot c^2.$$

**Радіоактивність** – це властивість деяких хімічних елементів випромінювати корпускулярне або електромагнітне випромінювання; вона може бути природною або штучною. Явище, як правило, приводить до зміни складу ядра елемента внаслідок чого утворюється новий елемент. Розрізняють три типи природної радіоактивності  $\alpha$ -  $\delta$ - і  $\gamma$ -.

**$\alpha$ -випромінювання** за складом є потоком ядер гелію, вони мають велику масу та енергію.

**$\beta$ -випромінювання** – це потік швидких електронів, які внаслідок малої маси і великої швидкості мають велику проникність.

*$\gamma$ -випромінювання* є електромагнітним випромінюванням з малою довжиною хвилі, мають велику енергію кванта і значну проникну здатність.

При ядерних реакціях можливе випромінювання інших елементарних частинок: нейтронів, позитронів, нейтрино тощо.

Ядерна реакція полягає в тому, що в ядрі відбуваються певні структурні зміни при взаємодії ядра з елементарними частинками або іншими ядрами, внаслідок чого дане ядро випромінює елементарні частинки або поділяється на окремі частинки з масою меншою, ніж маса вихідного ядра. У ядерних реакціях діє закон збереження електричного заряду та маси.

*Період піврозпаду* – час, протягом якого розпадається половина всіх ядер радіоактивного елемента.

*Ланцюгова реакція* – реакція послідовного поділу ядер радіоактивних елементів під дією нейтронів, які утворюються при поділі інших ядер.

### **3. Навчальний фізичний експеримент**

Фізичний експеримент, який міг би бути суттєвим підкріпленням теоретичних описових викладок змісту теми обмежений демонстраціями реєстрації природного радіоактивного фону за допомогою лічильника Гейгера-Мюллера [10, с. 263] та треків альфа-частинок за допомогою моделі камери Вільсона [10, с. 261]. Санітарні норми забороняють використовувати радіоактивні препарати у навчальному фізичному кабінеті. Тому всі інші явища, пов'язані з радіоактивністю, можуть бути проілюстровані лише на рівні демонстраційних макетів, таблиць, відео, комп'ютерних моделей.

### **4. Методика вивчення основних питань теми**

Реалізація програмних вимог щодо вивчення фізики атомного ядра можлива у двох варіантах. Один з цих варіантів передбачає використання явища природної радіоактивності для формулювання висновку про його ядерне походження і про

складну будову ядра. У контексті викладу цього матеріалу, як правило, використовують історичний матеріал про відкриття і вивчення явища природної радіоактивності на прикладі наукових досліджень, проведених Анрі Беккерелем, П'єром Кюрі та Марією Складовською-Кюрі. При цьому учні мають можливість ознайомитися з трьома видами радіоактивного випромінювання і на основі цього зробити висновки про складну будову ядра атома. Такий підхід дозволяє формувати в учнів навички логічного мислення, робити висновки індуктивним шляхом.

Другий підхід передбачає використання знань учнів про будову ядра з протонів і нейтронів, отримані при вивченні фізики в основній школі. У такому випадку вчитель інформує учнів про складну будову ядра, а саме явище природної радіоактивності використовує для підтвердження початкових установок про будову ядра атома. Цей варіант методики вивчення матеріалу сприяє формуванню в учнів навиків теоретичного мислення, що є одним із завдань навчання фізики в старших класах.

Явище радіоактивності розглядається як таке, що відбувається відповідно до певних законів. Закон радіоактивності передбачає розрахунок кількості атомів радіоактивної речовини, яка залишилася після розпаду на протязі певного часу. Він визначає кількість радіоактивної речовини як функцію часу.

Найбільш поширеною формою запису цього закону, доступною для розуміння учнями, є форма, яка встановлює, що кількість атомів, які зазнали радіоактивного розпаду, залежить від початкової кількості атомів, їх специфікації та інтервалу часу

$$dN = -\lambda N dt .$$

Шляхом певних математичних перетворень цього виразу можна отримати формулу для розрахунку кількості атомів, які залишилися без зміни

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}} ,$$

де  $t$  – час розпаду;  $N_0$  – початкова кількість атомів;  $T$  – період піврозпаду, який показує, за який час розпадається половина всіх атомів даного елемента.

У підручниках наведені приклади виведення формул на основі суто логічних міркувань, а тому можуть бути сприйняті як штучні висновки. Тому розгляд методів спостереження радіоактивного випромінювання потрібно провести як доказ того, що вчені мають належні експериментальні засоби, які дозволяють підтвердити справедливість запису закону радіоактивного випромінювання. Серед багатьох методів спостереження і реєстрації радіоактивного випромінювання заслуговують на увагу методи, які базуються на використанні лічильника Гейгера-Мюллера та камери Вільсона. Вони дозволяють не лише вимірювати інтенсивність радіоактивного випромінювання, але і з'ясувати склад цього випромінювання. Ці методи залишаються і досі домінуючими в лабораторних ядерних дослідженнях. Принципи дії лічильника Гейгера-Мюллера і камери Вільсона доступні для розуміння учнями, які вже знайомі з явищами йонізації газу та конденсації перенасиченої пари.

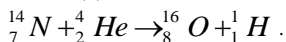
Важливе місце в процесі вивчення фізики атомного ядра займає розгляд ядерних процесів з точки зору закону збереження енергії. Такий підхід дозволяє обґрунтувати походження енергії зв'язку нуклонів у ядрі. Знайомлячись з радіоактивним випромінюванням, учні дізнаються, що випромінювання має певну енергію, оскільки при взаємодії з речовиною спричинює різні фізичні явища: нагрівання, свічення тощо. Це свідчить про те, що частинки, які входять до складу випромінювання, мають певні (досить великі) швидкості і відповідні кінетичні енергії. Не викликає в учнів сумніву і твердження про енергію  $\gamma$ -випромінювання, яке за природою є електромагнітною хвилею.

Згідно з законом збереження енергії для надання енергії частинкам і  $\gamma$ -променям потрібно виконати роботу. Зрозуміло, що така робота може бути виконана лише в ядрі, з якого відбувається радіоактивне випромінювання. З'ясувати походження такої роботи можна шляхом аналізу причин стійкості атомних ядер.

До складу всіх ядер входять протони, які мають позитивні заряди, а тому між ними діють електромагнітні сили відштовхування. Тому самі протони не можуть утворити таку стійку струк-

туру, якою є атомне ядро. Такі міркування дозволяють звернути увагу учнів на будову ядер заводневих елементів, структурними елементами яких обов'язково є нейтрони. Наявність нейтронів приводить до виникнення так званих ядерних сил, які мають обмінний характер і забезпечують велику стійкість атомних ядер. З цих причин атомне ядро має внутрішню ядерну енергію. Для більшої переконливості зроблених висновків доцільно нагадати учням про внутрішню енергію тіл, одна зі складових якої пов'язана з взаємодією молекул. Зрозуміло, що при розпаді ядра виконується робота і частинки та випромінювання набувають енергії.

Як приклад ядерної реакції традиційно розглядається реакція взаємодії ядер азоту та вільних  $\alpha$ -частинок, наслідком якої є утворення ядер кисню та виділення вільного протона.



На прикладі цієї ( або подібної) реакції можна сформулювати правила зміщення в ядерних реакціях.

Залишається відкритим питання про залежність результатів ядерних реакцій від енергії первинних частинок до взаємодії. Це неможливо зробити через відсутність належної підготовки учнів.

Обов'язковою вимогою програми є ознайомлення учнів з енергетичним виходом ядерних реакцій на основі понять дефекту мас та енергії зв'язку. З цією метою розв'язується задача на порівняння маси ядра певного елемента і суми мас нуклонів, які входять до складу ядра. Потрібні для цього дані можна знайти в таблицях. На основі знань учнів про еквівалентність маси і енергії, одержаних при вивченні розділу "Основи спеціальної теорії відносності", розраховується енергія зв'язку ядра або енергія частинок, які утворюються в реакції. Лише після цього вводиться атомна одиниця маси, як засіб спрощення розрахунків у ядерній фізиці. Виражена в енергетичному еквіваленті одна атомна одиниця маси приблизно дорівнює  $931 \text{ MeV}$ .

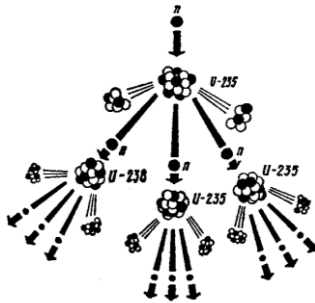
Якщо явище радіоактивності становить лише певний теоретичний інтерес для пізнання найпростіших закономірностей

світу атомних ядер, то вивчення явища поділу ядер дозволяє розкрити основні напрямки практичного застосування ядерної енергії, що стало можливим лише після відкриття явища спонтанного поділу ядер урану.

Найбільш зручною для пояснення реакції поділу урану є крапельна модель ядра атома. Така модель дозволяє провести аналогію між розпадом ядра і кипінням краплі рідини, що дозволяє забезпечити належний рівень наочності при вивченні нового матеріалу.

Повідомивши, що для ядер урану властива здатність спонтанно розпадатися з виділенням кількох нейтронів, розглядається процес проходження ядерної ланцюгової реакції. Попадаючи в ядро урану, нейтрони порушують рівновагу нуклонів у ядрі, внаслідок чого відстані між нуклонами та форма ядра змінюються і утворюється так звана гантель, яка потім розпадається на два осколки приблизно однакової маси. Обов'язково потрібно звернути увагу учнів на те, що при розпаді утворюється три чи більше швидких нейтронів. Ці нейтрони захоплюються іншими атомами і при певних умовах спричиняють їх розпад. Оскільки в такому випадку кількість вільних нейтронів швидко зростає, то зростає і кількість атомів, які зазнали розпаду. При цьому зростає загальна енергія у вигляді кінетичної енергії осколків і  $\gamma$ -променів.

Цей процес ілюструється прикладом реакції розпаду ядер урану та схемами такого розпаду (мал. 63).



Мал. 63

Після цього варто розглянути три можливих шляхи розвитку реакції розпаду ядер урану:

а) значна частина нейтронів втрачається, вилітаючи з урану або поглинаючись домішками інших речовин;

б) кількість випромінених і поглинутих нейтронів підтримується сталою;

в) кількість нейтронів і ядер, які розпалися, зростає в геометричній прогресії.

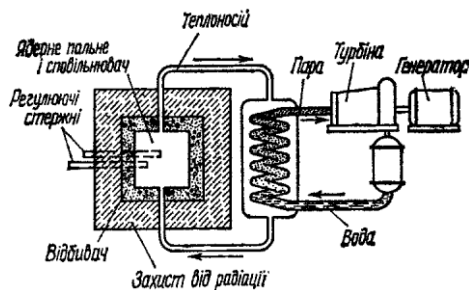
Згідно з такими задекларованими випадками робляться відповідні висновки:

а) реакція поділу швидко затухає, спостерігаються лише спонтанні акти розпаду ядер (радіоактивність);

б) реакція поділу проходить стабільно, виділення енергії відбувається рівномірно;

в) швидкість виділення енергії різко зростає, що веде до вибуху.

Такий аналіз дозволить обминути необхідність розгляду атомної бомби і відразу “сконструювати” атомний реактор. Відповідно до викладених вище висновків така конструкція повинна складатися з ядерного палива, уповільнювача нейтронів, поглинача нейтронів, системи відводу енергії і охолодження реактора. Розглядаючи будову атомної електростанції, важливо показати, що по суті це теплова електростанція, але джерелом енергії є не хімічне, а ядерне паливо (мал. 64).

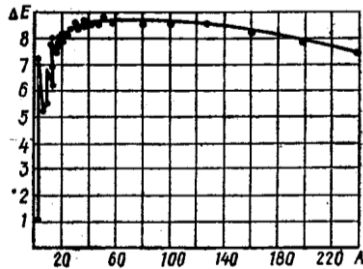


Мал. 64



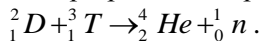
Так можна спростити процес розгляду прикладів мирного використання ядерної енергії.

Перспективним напрямком розвитку ядерної енергетики є використання енергії, яка виділяється в реакціях ядерного синтезу. Усталилася така методика вивчення цього питання, в якій висновки про можливість виділення енергії при синтезі важких ядер з легких робиться на основі аналізу графіка залежності питомої енергії нуклонів від порядкового номера хімічного елемента (мал. 65).



Мал. 65

Наявність крутого підйому кривої на графіку свідчить про можливість двох шляхів одержання ядерної енергії – при розпаді і при синтезі ядер. Якщо перший шлях розкривається на прикладі поділу ядер урану, то другий шлях можна проілюструвати на прикладі утворення гелію при реакції ядер дейтерію та тритію:



Важливо вказати, що така реакція можлива лише за температури порядку  $10^8$  К, але завдяки дослідженням вона вже здійснена в термоядерних реакторах типу “Токамак”. У природніх же умовах подібні реакції відбуваються в надрах Сонця та інших зірок.

Актуальним питанням сучасної ядерної енергетики є боротьба з екологічними наслідками використання ядерної енергії. До них потрібно віднести проблему поховання відпрацьованого ядерного палива, яке має досить велику залишкову радіоактивність, забруднення навколишнього середовища радіоактивним

викидами і пов'язані з цим зміни екосистеми Землі. Наочним прикладом цього може бути аварія на Чорнобильській АЕС. Ця аварія привела не тільки до загибелі людей під час аварії, але і до масових захворювань людей, які живуть на забруднених територіях. Радіоактивне випромінювання, діючи на живі організми, руйнує його структурні елементи, викликає утворення шкідливих речовин, які отруюють організм. Опромінення організму приводить до зміни генетичного коду живих організмів, що приводить до появи мутантів і інших спотворень.

Закінчується вивчення розділу вивченням властивостей елементарних частинок. У цілому, цей матеріал вивчається в плані ознайомлення на основі таблиці, в якій приведена класифікація елементарних частинок. Такі таблиці є в підручниках для випускних класів, де програмою передбачене вивчення ядерної фізики. У процесі розгляду класифікації і властивостей найбільш поширених елементарних частинок окрему увагу потрібно приділити порівнянню властивостей частинок і античастинок. У процесі анігіляції, який відбувається між ними, проявляється єдність двох видів матерії – речовини і поля. Такі висновки важливі для формування в учнів наукового світогляду, для формування в учнів сучасної наукової картини світу.

## 5. Типові задачі

► На розрахунок атомних реакцій на основі законів збереження маси і електричного заряду

Під час бомбардування ізотопу Бору ( ${}_{5}^{10}\text{B}$ )  $\alpha$ -частинками утворюється ізотоп азоту ( ${}_{7}^{13}\text{N}$ ). Яка частинка при цьому викидається?

► На розрахунок дефекту мас і енергії зв'язку ядер

Визначити енергію зв'язку ядра Алюмінію ( ${}_{13}^{27}\text{Al}$ ).

►► *На розрахунок енергетичного виходу ядерних реакцій розпаду ядер урану та синтезу важких ядер з легких*

*Унаслідок поділу одного ядра Урану ( ${}_{92}^{235}\text{U}$ ) на два осколки виділяється приблизно 200 MeV енергії. Яка енергія виділиться при спалюванні в ядерному реакторі 1 г цього ізотопу? Порівняти її з енергією, яка виділяється при утворенні такої ж кількості гелію в термоядерній реакції ядер Дейтерію та Тритію.*



### **Питання для самоконтролю**

1. Яке місце теми в системі вивчення фізики в школі?
2. Який зміст теми?
3. Які можливі шляхи введення уявлень про складну будову ядра атома?
4. Які експериментальні засоби можуть бути використані при вивченні теми?
5. Які особливості вивчення будови атомної електростанції?
6. Які моделі можуть бути застосовані в навчальному процесі?
7. Як здійснюється екологічне виховання учнів на уроках при вивченні ядерної фізики?
8. Які особливості вивчення фізики елементарних частинок?

---

## Лекція 19.

### УЗАГАЛЬНЮЮЧІ ЗАНЯТТЯ З ФІЗИКИ

#### 1. Узагальнення як психолого-дидактична категорія

Розвиток сучасного суспільства породжує багато проблем не лише у виробничій сфері, але і в сфері формування особистості, адекватної сучасному стану розвитку суспільства, врахування перспектив розвитку людського суспільства. Одним із напрямків розв'язання проблеми є формування у школярів науково-теоретичного мислення. Важливим етапом цього процесу є узагальнення вивченого матеріалу [20, с. 321-323].

Якщо мати на увазі процес узагальнення, то це складний процес, в якому дитина переходить від опису окремих конкретних предметів до їх знаходження серед цілого класу подібних предметів. Тут дитина знаходить і виділяє окремі стійкі властивості цих предметів, які повторюються від предмета до предмета.

Результатом процесу узагальнення має бути сформоване вміння учня відійти від деяких часткових і несуттєвих ознак і властивостей та виділити найсуттєвіші ознаки і властивості.

Узагальнення, як правило, розглядається в органічній єдності з абстрагуванням. Виділення деякої якості як загального передбачає відділення його від інших якостей. Це дозволяє учневі перетворювати загальну якість у самостійний і особливий предмет наступних дій.

Комбінацію з двох, трьох і більше абстрактно-загальних ознак, яка стає значенням того чи іншого слова, зазвичай називають поняттям. Змістом поняття є комплекс узагальнених і взаємозв'язаних ознак предмета.

Формування понятійного узагальнення передбачає не тільки перехід від конкретного і одиничного до абстрактного і загального, але і зворотній перехід від загального і абстрактного до одиничного і конкретного.

## 2. Узагальнення на уроках фізики

Процес узагальнення властивий і для фізики як навчального предмета. Стрижневою лінією всіх методик є процес формування фізичних понять як окремого класу узагальнень властивостей і ознак фізичних тіл та явищ.

Кінцевим результатом вивчення кожної теми програми є формування вміння учнів пояснювати явища чи фізичні тіла та виділяти їх з-поміж інших, застосовувати їх при вивченні наступного навчального матеріалу. Разом з тим для фізики властиве багаторівневе узагальнення знань і формування фізичних понять. Учні повинні вміти розрізняти не лише предмети і явища певного класу, але і робити більш широкі висновки про зміст і особливості та відмітні ознаки явищ і предметів, які вивчаються в окремих частинах чи розділах фізики. Процес узагальнення проводиться не тільки на понятійному рівні, але і на рівні законів і теорій.

При узагальненні фізичних знань можливе використання різних дидактичних прийомів. Одним з таких прийомів є проведення спеціально розроблених узагальнюючих занять, провідна роль у проведенні яких належить учителю. Хоча не виключається можливість участі учнів у їх підготовці і супроводі.

Програмою середньої школи з фізики передбачено проведення узагальнюючих занять наприкінці кожного класу. Так, курс механіки 9 класу закінчується узагальнюючою лекцією “Механіка і механізація виробництва”. У програмі 10 класу вказується на необхідність проведення лекції “Основні закони електродинаміки та їх технічне застосування”. Вивчення ж фізики в 11 класі закінчується двома лекціями “Сучасна наукова картина світу” та “Фізика і науково-технічний прогрес” [30, с. 255-267].

Узагальнюючою ознакою цих лекцій є принцип зв'язку фізики й техніки. За думкою розробників програми такий підхід дозволяє максимально реалізувати принцип узагальнення. Тому такі узагальнюючі лекції є фактично фізико-технічними. По окремих розділах виділяють такі узагальнення: застосування законів механіки до вивчення законів небесної механіки, теплова

форма руху матерії і її особливості, електромагнітне поле як вид матерії, корпускулярно-хвильова природа світла, ядерні перетворення, взаємоперетворюваність елементарних частинок і закони збереження. Узагальненню знань учнів по всьому курсу фізики служить заняття, що проводиться як лекція “Сучасна наукова картина світу”, у якій узагальнюється ідея матеріальної єдності всієї природи – від елементарних частинок до Всесвіту, зв’язок мікро- та макросвітів, діалектичний характер розвитку природи, безмежність процесу її пізнання. Друга узагальнююча лекція програми фізики 11 класу на тему “Фізика та науково-технічна революція” передбачає розгляд взаємозв’язку фізики і техніки, фізичних основ космонавтики, фізичних основ енергетики, передачі інформації, створення систем автоматичного керування, роль фізики для механізації народного господарства, електрифікації та автоматизації виробництва, впровадження інформаційних технологій у виробництво тощо. Велике пізнавальне і виховне значення має показ зростаючої ролі застосування нової фізики в сучасному високорозвиненому виробництві, перетворюючої ролі науки в розвитку сучасного виробництва.

Узагальнення фізичних знань дозволяє завершити формування цілісних наукових поглядів на розвиток природи, що здійснюється на лекції “Сучасна наукова картина світу”, яка зводить усі здобутки фізики як науки в єдиний комплекс “Картина світу”.

### **3. Узагальнюючі лекції як форма узагальнення програмового матеріалу**

#### ***А. Механіка і механізація виробництва***

Тема заняття відображає один з напрямків науково-технічної революції. Перед ним стоїть завдання показати роль фізики в розвитку механізації, задачі і перспективи розвитку машинобудування.

На цьому занятті немає потреби знайомити учнів з будовою конкретних машин, а варто повторити лише фізичні принципи роботи, розглянути наукові засади застосування машин і механізмів у різноманітних галузях сучасного виробництва.

Заняття може бути проведене за таким планом:

1. Загальні відомості про машини.
2. Основні галузі застосування машин і механізмів.
3. Перспективи подальшої механізації виробництва.

Систематизацію знань учнів про основні частини машин і галузі їх застосування, як правило, проводять з застосуванням блок-схем.

Одночасно розглядаються конкретні приклади типових машин, на яких можна яскраво проілюструвати дію законів механіки.

### ***Б. Основні закони електродинаміки і їх практичне застосування***

Через великий об'єм вивченого матеріалу в 10 класі і складність його систематизації навколо певної змістової лінії заняття може проводитися по окремих, вужчій за обсягом темі. Однією з таких тем може бути тема “Електропровідність фізичних середовищ і їх застосування”.

Метою цього заняття є узагальнення і систематизація знань учнів про електропровідність різноманітних середовищ, а також про практичне застосування законів провідності в технічних пристроях і технологічних процесах.

У основі систематизації лежить порівняння природи носіїв зарядів у вакуумі, металах, електролітах, газах і напівпровідниках, характеру залежності провідності різних середовищ від температури, сили струму і напруги. Заняття планується у відповідності з циклом теоретичного пізнання:

- 1) дослідні факти;
- 2) модель провідності різноманітних середовищ;
- 3) вольт-амперні характеристики;
- 4) залежність опору різних середовищ від температури;
- 5) практичне застосування різноманітних середовищ.

Основним методом проведення узагальнюючого заняття є бесіда, хоча можуть бути і інші активні форми роботи з учнями. Суттєве місце при цьому займає демонстраційний експеримент. Разом з тим потрібно надати належної уваги прикладним питанням, це дозволить розглянути питання під іншим кутом зору,

оскільки більшість відомих дослідів були розглянуті при вивченні матеріалу на протязі року. При цьому потрібно приділити увагу найновішим досягненням у відповідній галузі, де застосовуються особливості проходження електричного струму в різних середовищах.

### **В. Фізика і науково-технічний прогрес**

Заняття на таку тему проводиться за програмою 11 класу наприкінці вивчення курсу фізики. Тому на неї покладається завдання узагальнити не тільки програму 11 класу, але і всього шкільного курсу фізики. Тому випускникам потрібно показати значення фізики для прискорення науково-технічного прогресу, вплив фізики на розвиток науки і техніки, взаємозв'язок фізики і техніки. Змістовою лінією узагальнення і систематизації можуть служити основні напрями науково-технічного прогресу, хоча можливі і варіанти розгляду перспективних напрямів у науці.

Схема узагальнення може бути орієнтовно такою: основні поняття, закони, теорії – напрями науково-технічного прогресу – галузі виробництва – фізичні основи дії конкретних технічних об'єктів.

Заняття потрібно розпочати зі з'ясування таких понять як науково-технічний прогрес і науково-технічна революція.

Науково-технічний прогрес – єдиний, взаємообумовлений процес розвитку науки і техніки ; основа соціального прогресу.

Науково-технічна революція – це корінне, якісне перетворення виробничих сил на основі перетворення науки у провідний фактор розвитку суспільного виробництва, безпосередньо у виробничу силу.

Сучасна науково-технічна революція характерна тим, що взаємозв'язок фізики і техніки постійно підсилюється. Розвиток техніки все більше опирається на досягнення науки.

Зворотній вплив техніки на розвиток фізики проявляється в тому, що фізиці доводиться розв'язувати задачі, які ставить перед нею техніка. Потреби техніки стимулюють виникнення нових напрямків у фізичній науці.



Характерною особливістю розвитку сучасної науково-технічної революції є скорочення часу між науковим відкриттям і його впровадженням у техніку.

Після з'ясування суті вказаних понять учні можуть виступити з доповідями за рефератами про розвиток конкретних галузей техніки та вплив фізики на них. Корисною буде дискусія на тему заняття.

На закінчення заняття вчитель повинен вказати на перспективні напрями розвитку науки і техніки.

### **Г. Фізична картина світу**

Це заняття має специфічне завдання. Завершуючи програму всього курсу фізики середньої школи, воно знайомить учнів з однією з найбільш загальних теорій, яка відображає сучасні уявлення про будову Всесвіту. У зв'язку з цим вона сприяє формуванню вищого рівня наукового світогляду, який базується на найбільш узагальнених поглядах сучасної науки. Застосування її положень дає можливість пояснити закономірності як неживого світу, так і світу біологічних об'єктів.

Заняття може бути побудоване за такою схемою.

1. Поняття фізичної картини світу.
2. Еволюція фізичної картини світу
3. Основні риси сучасної картини світу.

#### **1. Фізична картина світу**

Розкриваючи зміст поняття фізичної картини світу варто пояснити учням, що людство на протязі свого розвитку намагалося охопити своєю уявою всю структуру оточуючого середовища в його взаємодіях, усвідомити дію законів, загальних для всього світу тощо. Постійно узагальнюючи потік наукових знань, людина намагалася вписати їх в організовану оболонку, в якій діє взаємодія і перетворення. Така організація узагальнених знань одержала назву наукової картини світу. “Під фізичною картиною світу, – писав А.Ейнштейн, – варто розуміти систему фундаментальних ідей, понять і законів...”. У основі фізичної картини лежать певні філософські уявлення та ідеї. Фізична картина є частиною природничо-наукової картини світу, яка в свою чергу входить складовою частиною в сучасну наукову картину світу.

## ***2. Розвиток наукової картини світу***

Учням корисно буде дізнатися, що історія науки виділяє три фізичні картини світу: механістичну, електромагнітну, квантово-польову. До зміни кожної з них приводило накопичення і узагальнення знань на основі певної фізичної спільності. Так, механістична картина світу склалася як узагальнення механістичних метафізичних поглядів на природу. Її творцями називають Галілея та Ньютона. Для цієї картини властиві погляди на природу як сукупність атомів, які перебувають у хаотичному русі, здійснюючи механічні переміщення в абсолютному просторі, не зв'язаному з матерією і незалежного від неї. Час абсолютний і є тривалістю процесів, і не залежить від зовнішніх факторів. Універсальною взаємодією вважалася гравітація. Будь-який стан тіла визначався як однозначно визначений його початковим положенням.

Накопичення нових фактів і знань про природу діалектично викликало суперечливість між існуючими теоріями і новими фактами. Неможливість пояснення електромагнітних явищ на основі уявлень класичної механіки привела до введення поняття електромагнітного поля і електромагнітної взаємодії. Це стало початком розбудови електромагнітної картини світу, біля витоків якої стояли М. Фарадей і Д. Максвелл.

Електромагнітна картина світу основана на уявленні про те, що матерія існує не тільки у формі речовини, але і в вигляді електромагнітного поля. Плідність електромагнітної картини світу для свого часу проявилася у створенні на її основі спеціальної теорії відносності, яка відкрила шлях до розбудови більш сучасних моделей світоустрою.

Накопичення нових фактів і їх вивчення (фотоефект, випромінювання чорного тіла, спектри електромагнітного випромінювання), поставило на порядок денний питання про перегляд електромагнітної картини світу. У зв'язку з цим з'явилася квантова теорія Планка, започаткована на початку ХХ століття гіпотезою Макса Планка про квантування природних процесів.

### 3. Сучасна наукова картина світу

Сучасна наукова картина світу (СКС) несуперечливо об'єднує позитивні здобутки раніше розглянутих картин світу з найновішими досягненнями у вивченні природи. Основним положенням для побудови такої теорії крім наукових уявлень різних етапів розвитку науки став принцип взаємодоповнюваності, згідно з яким вищий рівень узагальнення містить у собі потенціально можливість для висновків нижчого рівня.

Як і всі попередні теорії СКС розглядає питання про властивості матерії, її рух, взаємодії тощо на основі найновіших результатів практичних і теоретичних досліджень. Важливу роль у побудові СКС відіграють дослідження астрофізики.

Вивчення СКС ускладнюється тим, що вона ще не вичерпала себе і знаходиться в стадії формування, а тому не можна визначити її повний зміст.

Картина охоплює декілька аспектів.

**1. Уявлення про матерію.** З точки зору сучасної фізики існує два види матерії: речовина і поле. Матеріальний світ поділяють відповідно на складові частини: мегасвіт, макросвіт та мікросвіт. Такий поділ не тільки викликаний розмірами фізичних об'єктів, але і особливостями взаємодій, які панують в тих чи інших світах. Так, переважаючою взаємодією у мегасвіті є гравітаційна. У мікросвіті ж переважають специфічні взаємодії на рівні елементарних частинок, при яких практично зникає відмінність між речовиною і полем.

**2. Взаємодії.** Сучасна фізика розрізняє чотири типи взаємодії: гравітаційна, слаба, сильна і електромагнітна. Такі взаємодії відрізняються одна від одної інтенсивністю і радіусом дії. Крім того, ці взаємодії мають і різне походження. Якщо гравітаційна та електромагнітна взаємодії є чисто польовими, то слабкі і сильні належать до так званих обмінних. Якщо до перших двох можна застосувати поняття сили в розумінні механіки Ньютона, то для обмінних таке поняття не застосовується, оскільки взаємодія здійснюється через обмін мезонами між частинками.

Разом з тим, для всіх взаємодій справджуються всі закони збереження.

Учням цікаво буде дізнатися, що вчені працюють над проблемою, сформульованою ще А.Ейнштейном. Він вважав, що всі види взаємодій пов'язані між собою і їх можна описати в рамках однієї теорії, яка умовно одержала назву Великого об'єднання.

**3. Рух матерії.** Учні повинні розуміти, що будь-якій формі матерії властивий рух. Форми руху різноманітні, рух не можна створити чи знищити. Різні форми руху взаємно перетворюються, і це проявляється в законі збереження енергії.

**4. Простір і час.** Формою існування матерії є простір і час. У сучасній фізиці простір і час пов'язані між собою, вони відносні і залежать від руху матерії. Властивості простору і часу визначаються матерією.



#### **Запитання для самоконтролю**

1. З якою метою проводиться узагальнення знань учнів?
2. Як формуються фізичні поняття?
3. Які форми узагальнення застосовуються в навчальному процесі з фізики?
4. Яка роль узагальнюючих занять з фізики?
5. Яка тематика узагальнюючих занять з фізики в старших класах середньої школи?
6. Який зміст узагальнюючого заняття з фізики в 9 класі?
7. Які особливості узагальнюючого заняття з фізики в 10 класі?
8. Яка мета і зміст узагальнюючих занять з фізики в 11 класі?

---

## ЛІТЕРАТУРА

1. Бабенко О.К. Методика викладання коливальних і хвильових явищ. – К.: Рад. шк., 1958. – 258 с.
2. Бугайов О.І. Вивчення атомної та ядерної фізики в школі. – К.: Рад. школа, 1982. – 158 с.
3. Бугаев А.И. Методика преподавания физики в средней школе. Теорет. основы. – М.: Просвещение, 1981. – 288 с.
4. Глазунов А.Т. и др.. Методика преподавания физики в средней школе: Электродинамика нестационарных явлений. Квантовая физика. Под ред. А.А. Пинского. – М.: Просвещение, 1989. – 272 с.
5. Гончаренко С.У. Фізика, 11 клас. – К.: Освіта, 1995. – 295 с.
6. Гончаренко С.У. Фізика, 10 клас. – К.: Освіта, 2002. – 319 с.
7. Гончаренко С.У. Методика навчання фізики в середній школі. Молекулярна фізика. – К.: Рад. школа, 1988. – 171 с.
8. Давыдов В.В. Виды обобщения в обучении. – М.: Просвещение, 1972. – 424 с.
9. Демонстрационный эксперимент по физике в средней школе. Ч. 1. Механика, молекулярная физика, основы электродинамики. Под ред. А.А. Покровского. Изд. 3-е, перераб. – М.: Просвещение, 1978. – 351 с.
10. Демонстрационный эксперимент по физике: Ч. 2. Колебания и волны. Оптика. Физика атома. Пособие для учителей / Под ред. А.А. Покровского. – 3-е изд., перераб. – М.: Просвещение 1979. – 287 с.
11. Каменецкий С.Е., Орехов В.П. Методика решения задач по физике в средней школе: Пособие для учителей. – 2-е изд., перераб. – М.: Просвещение, 1974. – 384 с.
12. Каменецкий С.Е., Пустильник И.Г. Электродинамика в курсе физики средней школы. – М.: Просвещение, 1978. – 127 с.
13. Кікоїн І.К., Кікоїн А.К. Фізика: Підруч. для 9 кл. середн. шк. – 2-е вид. – К.: Освіта, 1993. – 208 с.
14. Коршак Є.В., Миргородський Б.Ю. Методика і техніка шкільного фізичного експерименту. Практикум. – К.: Вища школа. – 1981. – 280 с.
15. Коршак Є.В. Коливання і хвилі. – К.: Радянська школа, 1974. – 120 с.
16. Коршак Є.В. та ін. Фізика, 9 кл.: Пробний підручник для серед. загальноосвіт. шк. / Є.В. Коршак, О.І. Ляшенко, В.Ф.Савченко. – Київ; Ірпінь: ВТФ “Перун”, 2000. – 232 с.
17. Коршак Є.В., Ляшенко О.І., Савченко В.Ф. Фізика, 10 кл.: Підруч. для загальноосвіт. навч. закл. – К.; Ірпінь: ВТФ “Перун”, 2002. – 296 с.
18. Коршак Є.В., Ляшенко О.І., Савченко В.Ф. Фізика, 11 кл.: Підруч. для загальноосвіт. навч. закл. – К.; Ірпінь: ВТФ “Перун”, 2004. – 288 с.
19. Марголис А.А., Парфентьева Н.Е., Иванова Л.А. Практикум по школьному физическому эксперименту. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Просвещение, 1977. – 304 с.

20. Методика преподавания физики в средней школе: Частные вопросы: Учеб. пособие для студентов пед. ин-тов по физ.-мат. спец. / С.В. Анофрикова, М.А. Бобкова, Л.А. Бордонская и др.; Под ред. С.Е. Каменецкого, Л.А. Ивановой. – М.: Просвещение, 1987. – 336 с.
21. Методика преподавания физики в средней школе. Молекулярная физика. Электродинамика. Под ред. С.Я. Шамаша. 2-е изд. – М.: Просвещение, 1987. – 256 с.
22. Методика преподавания физики в 8-10 классах средней школы. Ч. 1 / Под ред. В.П. Орехова и А.В.Усовой. – М.: Просвещение, 1980. – 320 с.
23. Методика преподавания физики в 8-10 классах средней школы. Под ред. В.П. Орехова, А.В.Усовой. Ч. 2 – М.: Просвещение, 1980. – 351 с.
24. Миргородський Б.Ю., Шабаль В.К. Демонстраційний експеримент з фізики. Електродинаміка. – К.: Рад. школа, 1983. – 176 с.
25. Миргородський Б.Ю., Шабаль В.К. Демонстраційний експеримент з фізики. Коливання і хвилі: Посібник для вчителів. – К.: Рад. шк., 1985. – 168 с.
26. Миргородський Б.Ю., Шабаль В.К. Демонстраційний експеримент з фізики: Молекулярна фізика. Посібник для вчителів. – К.: Рад. шк., 1982. – 140 с.
27. Миргородський Б.Ю., Шабаль В.К. Демонстраційний експеримент з фізики: Механіка. Посібник для вчителів. – К.: Рад. шк., 1980. – 144 с.
28. Молотков Н.Я. Изучение колебаний на основе современного эксперимента. – К.: Рад. Школа, 1988. – 160 с.
29. Мултановский В.В. Физические взаимодействия и картина мира в школьном курсе физики. – М.: Просвещение, 1977.
30. Научные основы школьного курса физики. Под ред. С.Я. Шамаша, Э.Е. Эвенчик. – М.: Педагогика, 1985. – 240 с.
31. Орехов В.П. Колебания и волны в курсе физики средней школы. – М.: Просвещение, 1977. – 176 с.
32. Орехов В.П., Корж Е.Д. Преподавание физики в 9 классе средней школы. – М.: Просвещение. 1986. – 176 с.
33. Физический энциклопедический словарь / Гл. редактор А.М. Прохоров. – М.: Сов. энциклопедия. – 1983. – 928 с.
34. Фізика, 10–11 кл.: Програма для профільн. кл. загальноосвіт. навч. закладів з укр. мовою навч. / [О. Бугайов, М. Головки, Л. Закота та ін.]. – К.: Пед. преса, 2004.
35. Шахмаев Н.М., Шиллов В.Ф. Физический эксперимент в средней школе: Механика. Молекулярная физика. Электродинамика. – М.: Просвещение, 1989. – 255 с.
36. Шахмаев Н.М. и др. Физический эксперимент в средней школе: Колебания и волны. Квантовая физика / Н.М. Шахмаев, Н.И. Павлов, В.И. Тыщук. – М.: Просвещение, 1991. – 223 с.

---

## ЗМІСТ

<b>Розділ I. М Е Х А Н І К А</b>	<b>5</b>
Лекція 1. Методика вивчення теми “ОСНОВИ КІНЕМАТИКИ”	5
Лекція 2. Методика вивчення теми “ОСНОВИ ДИНАМІКИ”	24
Лекція 3. Методика вивчення теми “ЗАКОНИ ЗБЕРЕЖЕННЯ”	41
<b>Розділ II. М О Л Е К У Л Я Р Н А Ф І З И К А</b>	<b>57</b>
Лекція 4. Методика вивчення теми “ОСНОВИ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ”	57
Лекція 5. Методика вивчення теми “ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ”	79
Лекція 6 – 7. Методика вивчення ВЛАСТИВОСТЕЙ РЕЧОВИНИ В РІЗНИХ АГРЕГАТНИХ СТАНАХ	98
<b>Розділ III. Е Л Е К Т Р О Д И Н А М І К А</b>	<b>113</b>
Лекція 8. Методика вивчення теми “ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ”	113
Лекція 9. Методика вивчення теми “ЗАКОНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ”	128
Лекція 10. Методика вивчення теми “МАГНІТНЕ ПОЛЕ”	145
Лекція 11. Методика вивчення теми „ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ”	156
Лекція 12. Методика вивчення теми “ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ”	177
Лекція 13. Методика вивчення теми “МЕХАНІЧНІ КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ”	191
Лекція 14. Методика вивчення теми “ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ”	209
Лекція 15. Методика вивчення теми “ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ”	229
<b>Розділ IV. К В А Н Т О В А Ф І З И К А</b>	<b>245</b>
Лекція 16. Методика формування ПОЧАТКОВИХ КВАНТОВИХ УЯВЛЕНЬ	245
Лекція 17. Методика вивчення БУДОВИ АТОМА	255
Лекція 18. Методика вивчення ОСНОВНИХ ПОЛОЖЕНЬ ЯДЕРНОЇ ФІЗИКИ	264
Лекція 19. УЗАГАЛЬНЮЮЧІ ЗАНЯТТЯ З ФІЗИКИ	276

**Віталій Федорович САВЧЕНКО,  
Микола Павлович БОЙКО,  
Микола Миколайович ДІДОВИЧ,  
Віктор Миколайович ЗАКАЛЮЖНИЙ,  
Микола Петрович РУДЕНКО**

**КОНСПЕКТИ ЛЕКЦІЙ  
З МЕТОДИКИ НАВЧАННЯ ФІЗИКИ  
В СТАРШІЙ ШКОЛІ**

Посібник для студентів  
фізико-математичних факультетів  
педагогічних вищих навчальних закладів

Технічний редактор

***О.Клімова***

Комп'ютерна верстка  
та макетування

***О. Клімова***

---

Підписано до друку 19.11.07. Формат 60x84 1/16.  
Папір офсетний. Друк на різнографі.  
Ум. друк. арк. 16,74. Обл.-вид. 10,3.  
Наклад 300 прим. Зам. №224.  
Редакційно-видавничий відділ ЧДПУ імені Т.Г.Шевченка.  
14013, вул. Гетьмана Полуботка, 53, к. 208.  
Тел. 65-17-99.